Bioterrorismus und die eigentliche Seuchengefahr

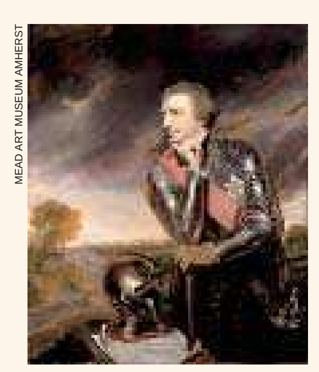


Reinhard Breuer

Man muss schon bis zum Jahr 1763 zurückgehen, um in einem Krieg auf tatsächlich benutzte Biowaffen zu stoßen. Damals notierte der Oberbefehlshaber Englands in Amerika, Jeffrey Amherst: „Ist es nicht denkbar, dass wir die Pocken über diese schrecklichen Indianerstämme kommen lassen?“ Und wusste auch gleich das Rezept: „Sie tun gut daran, die Indianer mit Hilfe von Decken anzustecken und jede Methode zu versuchen, die dazu beitragen kann, diese schreckliche Rasse auszulöschen.“

Von solchem Horror möchte man sich gerne weit entfernt sehen. Doch die Milzbrand-Anschläge nach dem 11. September 2001 holen den Bioterrorismus zurück in die Gegenwart (siehe auch unseren Bericht über den Milzbrand ab Seite 34). Auch vor Pocken steigt die Angst. Da längst ausgerottet, wird niemand mehr (von einzelnen Berufsgruppen abgesehen) gegen diese Erreger geimpft. Oft wird in dem Zusammenhang die Gefahr neuer, noch bösartigerer in Laboren entwickelter Biowaffen beschworen, gegen die Betroffene sich kaum mehr durch Impfstoffe zur Wehr setzen könnten.

Aber trotz des hohen Gefahrenpotenzials halten Experten die Wahrscheinlicheit eines massenwirksamen Bioanschlags für eher gering. Im Gegensatz dazu wird die Menschheit viel schrecklicher und alltäglicher von zahlreichen „natürlichen“ Seuchen heimgesucht. Hier herrscht unter den Experten tatsächlich Alarmstimmung. Epidemien wie die Schlafkrankheit verbreiten sich seit den 60er Jahren. Viren wie Influenza entwickeln immer neue Varianten, Bakterien wie der Erreger der Lungenentzündung zeigen verstärkt Resistenzen.



MEAD ART MUSEUM AMHERST

Oberfehlshaber der britischen Armee: Jeffrey Amherst (1717–1797)

Allein die „Großen Drei“ – Malaria, Tuberkulose und Aids – forderten 1998 stündlich fast 700 Opfer, insgesamt sechs Millionen. Die Bilanz der Aids-Epidemie ist besonders deprimierend. Im Jahre 2000 starben rund drei Millionen Menschen an der Immunschwächekrankheit, gleichzeitig infizierten sich über fünf Millionen Menschen neu. In afrikanischen Ländern wütet das Virus besonders grausam: In Botswana etwa reduzierte sich die Lebenserwartung im letzten Jahrzehnt von 62 auf 50 Jahre.

Das Seuchenproblem ist menschengemacht. Als Folge erhöhter Mobilität mit Auswüchsen wie Sextourismus oder auch des internationalen Tierhandels verbreiten sich Viren und andere Keime rund um den Erdball. Vorhandene Impfstoffe sind für die Ärmsten unerschwinglich, an neu entwickelten fehlt es noch. Vor allem die Dritte Welt steuert auf eine Katastrophe zu. Nach WHO-Berichten sterben jährlich fünf Millionen Kinder, die Hälfte an Krankheiten, die im Prinzip einfach zu behandeln wären.

Abhilfen sind leicht zu benennen und schwer durchzusetzen: verbesserte öffentliche Hygiene, wirksamere Impfstoffe und Therapien, Kontrolle von Zwischenträgern und ein weltweites Überwachungssystem fordert etwa der Chef des Robert-Koch-Instituts, Reinhard Kurth. Sicher ist: Ähnlich wie in der globalen Allianz gegen den Terrorismus wird es eine globale Allianz gegen Seuchen geben müssen. Denn die Zeit läuft uns davon. ■

TITELBILD:

Erste Sterne entstanden kurz nach dem Urknall in Verdichtungen im kosmischen Urgas. Sie verglühten rasch, weshalb sie heute nicht mehr beobachtet werden können.
Grafik: Thomas Braun / Spektrum der Wissenschaft

TITELTHEMA:

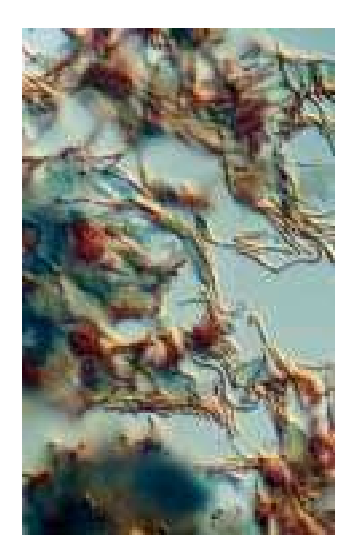
Die ersten Sterne im Universum

Seite 26



Von Richard B. Larson und Volker Bromm

Neuen Modellrechnungen zufolge waren die frühesten Himmelskörper außergewöhnlich massereich und hell, aber auch kurzlebig. Mit ihrer Entstehung nahm die Geschichte des Kosmos eine dramatische Wendung.



MILZBRAND Seite 34

Früher Geißel, heute Biowaffe

Von Willy Hansen und Jean Freney

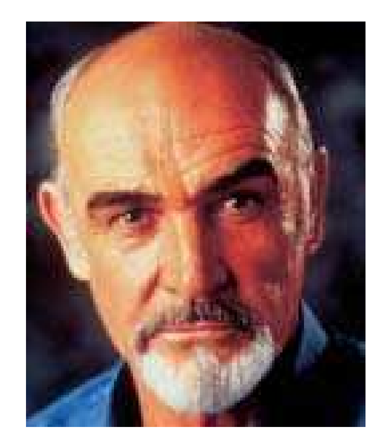
Die Tricks des heimtückischen Bazillus klären sich allmählich. Nun können Biochemiker gezielte Maßnahmen gegen seine tödlichen Gifte suchen.

Strategie des Milzbrand-Erregers

Seite 40

Von Michèle Mock

Eine der ältesten Plagen der Menschheit droht heute als biologische Waffe. Um sie zu entschärfen, sind auch Kenntnisse der neuesten Erregerstämme vonnöten.



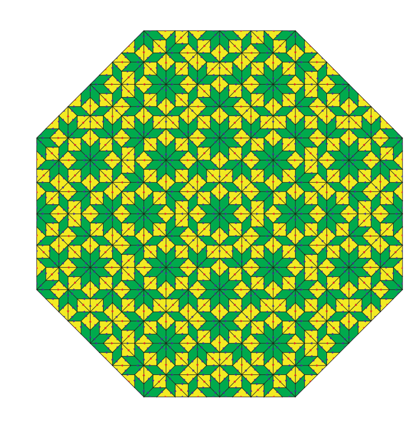
MEDIZIN Seite 46

Haarausfall an der Wurzel packen

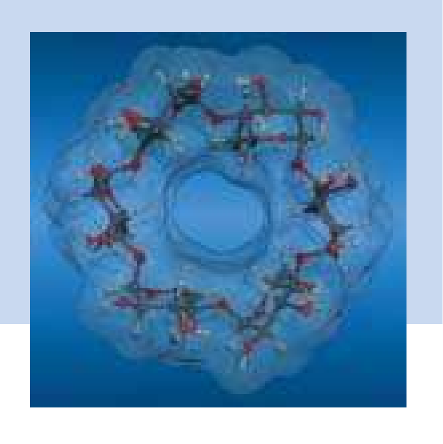
Von Ricki L. Rusting

Glatzenträger dürfen hoffen: Wenn die Erforschung des Haarwachstums weiterhin so große Fortschritte macht wie in den letzten fünf Jahren, kann ihnen vielleicht bald schon geholfen werden.









Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Das unterschätzte Kleinhirn – Leserbrief Dezember 2001

In meinem Leserbrief sind leider die Literaturangaben ausgelassen worden. Es sollte nicht der Eindruck entstehen, ich hätte eigene Ergebnisse mitgeteilt.

Nieuwenhuys R. & Nicholson C.: „Cerebellum of mormyrids“, Nature 215, 1967 und „Aspects of the histology of the cerebellum of mormyrid fishes“. In: Neurobiology of Cerebellar Evolution and Development. R. Llinás (ed.).

Prof. Wilh. Harder, Tübingen

Sabotage im Internet – Dezember 2001

Woher kommen die Würmer?

Als EDV-Leiter möchte ich folgende Anmerkungen machen: Was die Ursachen der diversen Würmer der letzten Monate angeht, so liegen sie ganz klar im Einsatz von Software mit (bekannten) riesigen Sicherheitslöchern, die zudem auch noch schlecht bis gar nicht administriert ist. Gerade Nimda hat gezeigt, dass Microsoft auf Sicherheit wenig Wert legt und dass viele IIS Server in der bekanntermaßen unsicheren Standardeinstellung laufen.

Rainer Freis, Eching

Sicherheitslücken sind hausgemacht

Sockets sind Filedeskriptoren mit Programmierschnittstellen zu genau definierten Netzwerklayern. Raw Sockets sind mitnichten eine Erfindung von Microsoft, wie man stellenweise im Artikel vielleicht missverstehen könnte, sondern gibt es in der Unix-Welt schon etwas länger. Sie setzen im Gegensatz zu beispielsweise TCP- oder UDP-sockets statt am so genannten „Transport Layer“ (Übertragungsschicht, im OSI-Referenz-Modell Layer 4) lediglich eine Ebene tiefer am Networt Layer (Vermittlungsschicht, OSI Layer 3) an und berühren die Frage der Netzwerksicherheit nur unwesentlich, da sich Netzwerkpakete durch geeignete Werkzeuge auf allen Ebenen fälschen lassen.

Sicherheitslücken entstehen in der Regel nicht durch „fehlerhafte Pakete“, sondern sind hausgemacht, sei es durch Programmierfehler (z. B. Bufferüberläufe), fehlerhaft konfigurierte oder gar keine Firewalls, schlampig implementierte Software oder falsch eingerichtete Browser und Mail-Clients. Selbst Outlook kann (und sollte) so eingerichtet werden, dass es Mail-Attachments nicht automatisch ausführt.

Andreas Berg, Berlin

Editorial – Dezember 2001

Herr Breuer spricht hier mehrfach von Hackern in einer Art und Weise, wie es ihnen nicht gerecht wird. Die Personengruppe, die der Autor vermutlich zu beschreiben meint, nennt man üblicherweise Cracker.

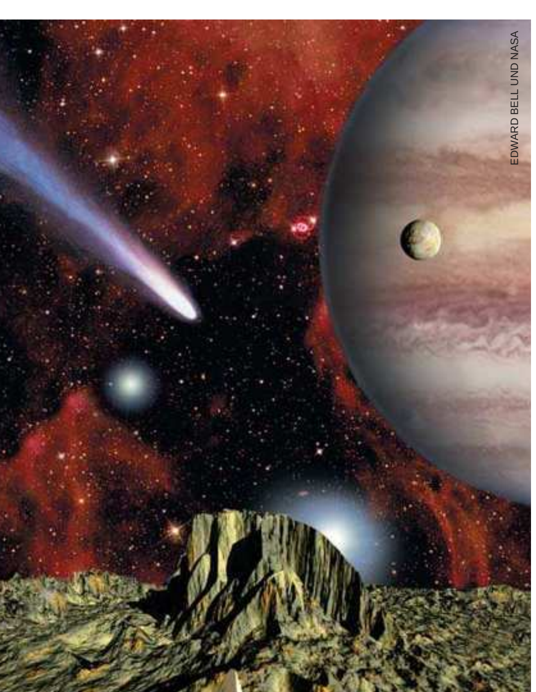
Auch ist die Aussage, dass „der Cyberspace zum Kriegsschauplatz zu werden droht“, schlichtweg überholt; denn seit Jahren ist bereits Krieg im Netz. Denkbar ungeschickt war auch die Wahl des Bildschirmfotos der Webseite www.kill.net, welche von Kim Schmitz betrieben wird. Bei ihm handelt es sich nicht um ein Sprachrohr der Hackerszene, vielmehr steht diese Person der Szene außen vor. Die These, dass dies ein typisches Beispiel für den Kampf der Szene gegen den Terror ist, ist Unsinn.

Marcus Herbert, Würzburg

Lebensfeindliches All – Dezember 2001

Was im Sonnensystem sonst so nicht vorkommt

Dieser Beitrag hebt sich erfreulich realistisch von anderen Veröffentlichungen ab, die modernistisch oder opportun quasi an „jeder Ecke“ einen bewohnten Planeten vermuten. Wenn die in dem Beitrag geschilderte Vielfältigkeit der Lebensvoraussetzungen mit der großen Anzahl der in der Erdgeschichte offenbar eingetretenen Zufälle der Lebensentwicklung multipliziert wird, dürfte nicht zu erwarten sein, dass auch nur eine annähernd große Anzahl Planeten mit Leben, insbesondere menschlichem oder menschenähnlichem Leben zu finden sein wird.



EDWARD BELL UND NASA

Dem Riesenplaneten droht Gefahr durch einen Komentenhagel und tödliche Strahlung.

Eine der offenbar wichtigsten Sonderbedingungen für die Entwicklung auf der Erde dürfte sich erst durch die jüngsten Erkenntnisse der erdgeologischen Forschung ergeben haben. Danach ist der innere Erdkern ein gegenüber dem Erdmantel mit eigenständigem Drehimpuls rotierender massiver Kern aus Eisen-Nickel, der beispielsweise bei den anderen Planeten des Sonnensystems so nicht vorkommt. Dieser massive Erdkern wird aber geologisch mit seiner Dynamik als ursächlich für die Bewegungstektonik des Erdmantels sowie der Erdkruste und damit für die Entwicklung der Erdoberfläche gehalten und er dürfte auch ursächlich für das Erdmagnetfeld und die äußeren absorbierenden Strahlungsgürtel sein.

Klaus Grigoleit, Hamburg

Zu kurze zeitliche Fenster

Das Fermi-Paradoxon („wo sind sie denn?“) lässt sich mit Einschränkung nicht durch zu kleine räumliche Nischen, sondern nur durch zu kurze zeitliche Fenster erklären: Wenn die mittlere Lebensdauer einer interstellar kommunikationsfähigen Zivilisation beispielsweise 1000 Jahre beträgt und die „ökologische Lebensspanne“ eines geeigneten Planeten mit 10^9 Jahren angesetzt wird (Erdalter = $4,5\times10^9$ Jahre), dann ist die Wahrscheinlichkeit, „jetzt“ noch eine weitere technische Zivilisation anzutreffen, nur etwa $10^3/10^9 = 10^{-6}$, also 1 zu einer Million. Bei vielleicht 10 Millionen an sich geeigneten Planeten verblieben dann nur noch 10 „derzeit aktive“ technische Zivilisationen, von denen die meisten aus räumlichen Gründen unerreichbar wären.

Prof. em. Werner Oldekop, Braunschweig

Wissenschaft im Internet
Oktober 2001

Auf der Suche nach dem Begriff „Stickstoff“ stellte der Computer die Frage „Can it be washed?“, und als Antwort war „No“ angegeben. Dies ist nicht exakt, denn wie alle Gase kann auch Stickstoff gewaschen werden. Der Chemiker hat dafür Gaswaschflaschen, welche die Waschflüssigkeit enthalten, durch die das Gas geleitet wird. Man kann mittels konzentrierter Schwefelsäure dem Gas die Feuchtigkeit entziehen oder mit Natronlauge saure Stickoxide entfernen. Also, als Antwort auf die Frage „Can it be washed?“ muss ein eindeutiges „Yes“ folgen.

Dr. P. Heiduschka, Münster

Hinweis
Im Deutschen Verein der Blinden und Sehbehinderten in Studium und Beruf e.V. (DVBS) werden seit einiger Zeit die Ausgaben von „Spektrum der Wissenschaft“ aufgelesen, um sie auch Blinden und Sehbehinderten zugänglich zu machen. Die Audio-Kassetten sind zu beziehen beim DVBS, Frauenbergstraße 8, 35039 Marburg/Lahn, Telefon: (06421) 94888-0.

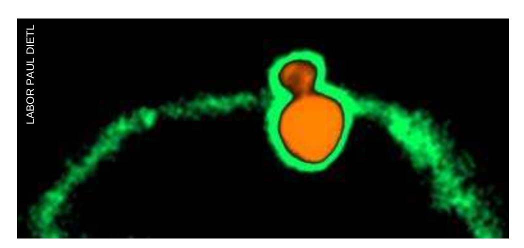
Wie die Lunge Luft holt – November 2001

Das Verdienst der Autoren Dietl, Haller und Schneider ist, den Vorgang der Exocytose an lebenden Zellen zeitlich aufgelöst und manipulierbar gemacht zu haben.

Die Bedeutung des Surfactant für die Atemmechanik, also „wie die Lunge Luft holt“, ist von den Autoren leider an dem herkömmlichen, aber falschen anatomischen Lungenmodell beschrieben worden. Die Alveolen existieren nicht als individuelle „Bläschen“ wie die Weintrauben an einer Rebe, sondern als dichte Packung von Polyedern wie die Honigwaben der Bienen, also mit gemeinsamen Trennwänden.

Ist die Luftatmung nach der Geburt etabliert, liegt die atemmechanische Bedeutung des Surfactant in der Verhinderung unphysiologischer Atelektasen durch „Offenhalten“ der kleinen und kleinsten Bronchien. („Anti-Klebstofffunktion“ des Surfactant).

Der Elektronenmikroskopiker Albert Vatter aus Denver/Colorado hat Surfactant-Strukturen an verschiedenen Gewebe-Oberflächen gefunden: Rippenfell, Herzbeutel, Gelenkschleimhaut. Auch in der Eustachischen Röhre gibt es Surfactant. Also überall dort, wo Gewebeoberflächen



Surfactant (orange) tritt zeitlich steuer- und dosierbar aus der Zellmembran nach außen.

gleitfähig sein oder sich leicht trennen lassen müssen.

Die Formulierung der Autoren „... wie die Lunge sich schmiert“ kommt der anti-adhäsiven Wirkung des biologischen Schmierstoffes Surfactant deshalb sehr nahe.

Dr. med. Rainer Reifenrath, Heidenheim

Anmerkung der Autoren:
Es ist richtig, dass Alveolen nicht als Bläschen wie Weintrauben, sondern in Polyederform wie Honigwaben existieren. Allerdings gibt es in jeder Alveole einen Flüssigkeitsfilm (Hypophase), und dieser hat die Tendenz, sich abzurunden. Insofern ist das „trockene“, histologische Bild zumindest in funktioneller Hinsicht nicht dem „feuchten“, lebenden Gewebe vergleichbar. Wir sind uns allerdings bewusst, dass das „bubble model“ des Alveolus nicht von allen akzeptiert wird, ein paar wenige Wissenschaftler rücken andere Surfactantfunktionen (Barrierefunktion etc.) in den Vordergrund (siehe Hills, J. Appl. Physiol. 87, 1999).

Die „Anti-Klebstoff-“ und die „Schmierfunktion“ von Surfactant in anderen Geweben (Rippenfell, Gelenke etc.) stehen nicht im Widerspruch zur Reduktion der Oberflächenspannung. Seifenartige Substanzen reduzieren sowohl die Oberflächenspannung als auch die Gleitreibung. Dies unterstreicht die vielfältigen Funktionen von Surfactant in unserem Körper. In der Lunge spielt aber die Reduktion der Oberflächenspannung sicher die entscheidende Rolle.

Nachtrag
Den Beitrag „Chirurgen aus Stahl“ in der Rubrik „Wissenschaft in Unternehmen“, Heft 12/01, verfasste Ulrike Zechbauer, Wissenschaftsjournalistin in München.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Daniel Fischer, Dr. Frank Scholz.
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sfr 13,50;im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von VNR Verlag, Bonn, VDI-Nachrichten, Düsseldorf und Universität Salzburg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

STRÖMUNGSDYNAMIK

Schutz der Windkraft vor der Kraft der Winde

Ein konzeptionell einfaches Vorhersageverfahren holt aus der turbulenten Luftbewegung gerade so viel Berechenbarkeit heraus, dass man noch rechtzeitig vor einer Bö die Rotorblätter einer Windkraftmaschine aus dem Wind nehmen kann.

Von Christoph Pöppe

Wind weht unregelmäßig – das ist einer der wesentlichen Nachteile der Windenergie. Dabei sind die langfristigen Schwankungen der Windstärke nicht das größte Problem. Ein konventionelles Kraftwerk kann eine Flaute, die sich lange genug vorher ankündigt oder hinreichend lange andauert, ohne übermäßige Anfahrverluste kompensieren.

An einem einzelnen Windrad schwankt die Windstärke weitaus schneller und heftiger: Es ist nicht ungewöhnlich, dass die Windgeschwindigkeit binnen einer Sekunde bis auf das Doppelte ansteigt. Für die Stromversorgung werfen diese raschen, lokalen Schwankungen kaum Probleme auf, denn sie sind voneinander praktisch unabhängig und mitteln sich daher aus – vorausgesetzt, es gibt genügend Windkraftanlagen.

Allerdings können heftige Böen die Rotorblätter beschädigen oder die Gesamtkonstruktion so belasten, dass auf die Dauer das Material ermüdet. Man sollte also möglichst dem Wind rechtzeitig die Angriffsfläche nehmen, indem man die einzelnen Rotorblätter „in den Wind stellt“. Nur kommt eine Bö in aller Regel so überraschend, dass eine solche Notmaßnahme nicht mehr rechtzeitig durchführbar ist.

Man müsste also über einen Zeitraum von einigen Sekunden die Windgeschwindigkeit vorhersagen oder zumindest mit einiger Zuverlässigkeit eine Warnung vor heftigen Böen abgeben können. Eine solche Prognose muss auf Daten basieren, die am Ort des Windrads selbst aufgenommen werden. Es wäre abwegig, einige hundert Meter vor dem Ziel Windmesser zu installieren, die einen heranrauschenden Windstoß rechtzeitig melden würden – sie müssten ja je nach Windrichtung an verschiedenen Stellen stehen.

Was selbst eine kurzfristige Prognose der lokalen Windgeschwindigkeit sehr schwer macht, ist das chaotische Verhalten von Luftströmungen. Aber das Unterfangen erscheint nicht aussichtslos, denn die Bewegung der Luft ist eben nur chaotisch und nicht schlimmer, also rein zufallsbestimmt. Das ergibt sich aus Daten echter Windkraftanlagen, die ungefähr zehnmal pro Sekunde – auf dem Umweg über die elektrische Leistung – die Windgeschwindigkeit messen. Die resultierende Zahlenreihe ist von deutlich anderer Art, als hätte jemand die einzelnen Werte oder die Differenzen aufeinander folgender Werte einfach ausgewürfelt. Es gibt sehr wohl einen Zusammenhang unter den Messdaten. Den Physikern Mario Ragwitz und Holger Kantz vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden ist es nun gelungen, diesen Zusammenhang mit Hilfe der Theorie dynamischer Systeme („Chaostheorie“) prognostisch zu nutzen (*Europhysics Letters, Bd. 51, S. 595*).

Im Prinzip ist die Atmosphäre, im Großen wie im Kleinen, ein System mit unendlich vielen Freiheitsgraden: Keine noch so große Zahl an Daten reicht aus, sie zu einem gewissen Zeitpunkt so genau zu beschreiben, dass man ihren künftigen Zustand vorhersagen könnte. In der geometrischen Anschauungsweise der Chaostheoretiker ist der Systemzustand ein Punkt in einem unendlichdimensionalen Raum. Vorauszusagen, wohin er wandern wird, erscheint ziemlich aussichtslos: Er hat ja unendlich viele Richtungen zur Verfügung.

Für chaotische Systeme ist jedoch typisch, dass der Punkt nur verhältnismäßig wenige Richtungen tatsächlich nutzt: Sein Weg beschränkt sich, bis auf kleine Abweichungen, auf eine niedrigdimensionale Teilmenge des unendlichdimensionalen Raums, einen so genannten Attraktor.

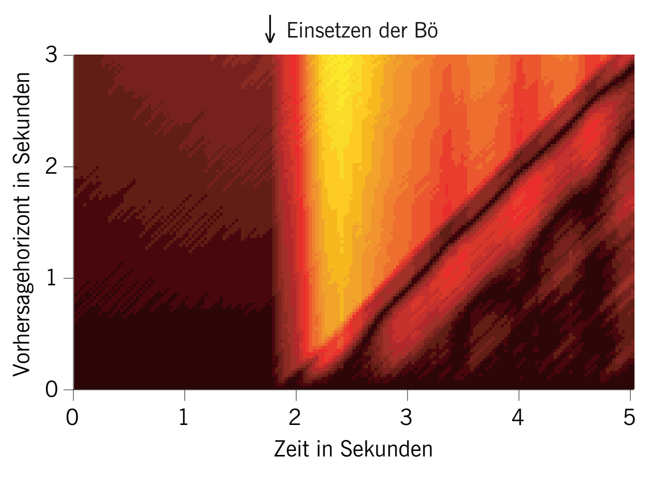
Vorhersage von Böen

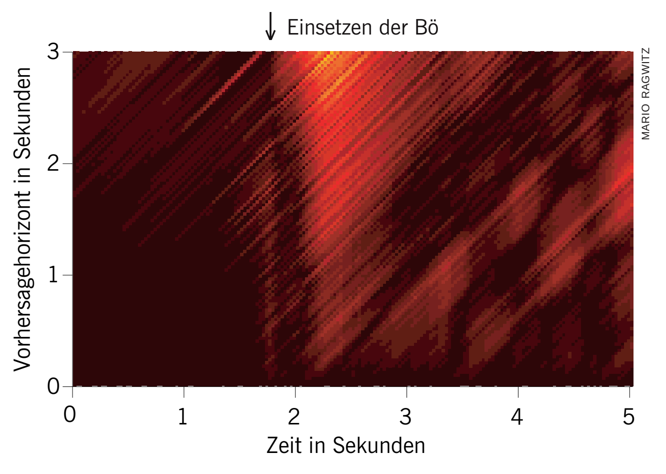
Man kann sogar nach einem etablierten Verfahren aus Messdaten berechnen, wie viele Dimensionen der Attraktor hat. Den entsprechenden Algorithmus publizierten Peter Grassberger von der Universität Wuppertal (derzeit am Forschungszentrum Jülich) und Itamar Procaccia (seit 1989 am Weizmann-Institut in Rehovot, Israel) schon im Jahre 1983. Liefert er beispielsweise das Ergebnis 7, so genügen im Prinzip sieben Zahlen, um das Verhalten des Systems zu beschreiben – nur ungefähr und für einen kurzen Zeitraum, aber immerhin. Diese sieben Zahlen sind dann zwar immer noch unbekannt, aber



KUNIO OWAKI / CORBISSTOCKMARKET

Windkraftanlagen – hier in einem Windpark in Kalifornien – können bei heftigen Böen Schaden nehmen.





Die Vorhersagefehler des herkömmlichen linearen (links) und des im Artikel beschriebenen nichtlinearen Modells (rechts) bei einer Bö sind hier über der Zeit und dem Prognosezeitraum („Vorhersagehorizont“) aufgetragen; dunkle Farben entsprechen kleinen, helle großen Fehlern. Mit dem Einsetzen der Bö steigt der Prognosefehler deutlich an, allerdings beim nichtlinearen Modell weit weniger. Es zeigt erst bei dem großen Vorhersagehorizont von drei Sekunden Prognoseschwächen.

sieben Messwerte ergeben sieben Gleichungen für diese Unbekannten, und wenn diese Gleichungen auch noch lösbar sind, hat man seine Prognose.

Leider liefert der Algorithmus von Grassberger und Procaccia zunächst unschlüssige Ergebnisse. Das System Atmosphäre, so wie es sich aus den Messreihen an einem einzigen Punkt darstellt, bewegt sich anscheinend allenfalls zeitweise auf einem niedrigdimensionalen Attraktor. Die gute Nachricht: Diese Zeiten erhöhter Vorhersagbarkeit sind genau diejenigen raschen Anstiegs der Windgeschwindigkeit. Das Anwachsen einer Bö findet einigermaßen geregelt statt, das Nachlassen dagegen ziemlich zufallsbestimmt. Das System bietet also gerade genug Regelhaftigkeit für das vorrangige Ziel der Prognose: die Böenvorhersage.

Gemessen an dem theoretischen Aufwand zu seiner Ableitung ist das Verfahren in der Praxis sogar relativ einfach: Ein Computerprogramm hält eine ausreichende Menge früherer Messdaten vorrätig. Zu jedem Zeitpunkt sucht es zu der Serie der – beispielsweise – sieben jüngsten Messwerte möglichst ähnliche Serien aus der Vergangenheit. Die Zukunft von damals kennt man ja schon: Es ist einfach die Fortsetzung der alten Messreihen. Das System wird sich diesmal so ähnlich entwickeln, nimmt man an – und berechnet als Prognose für das aktuelle Verhalten einen geeignet definierten Mittelwert der Fortsetzungen von einst.

Zusätzlich gewinnt man eine Einschätzung über die Zuverlässigkeit der Vorhersage: Wenn die früheren Messreihen sehr unterschiedliche Fortsetzungen hatten, ist die Zukunft von heute mit einer großen Unsicherheit behaftet.

Das Verfahren funktioniert jedoch nur bei einer sorgfältig abgestimmten Wahl der Parameter – etwa der Länge der Messreihen, für die in der Vergangenheit nach Entsprechungen gesucht wird.

Interessanterweise geht in die theoretische Ableitung wie die praktische Umsetzung der Methode so gut wie nichts von der Physik der Atmosphäre ein – außer dass sie eben chaotisch ist. Gleichwohl liefert das Verfahren von Ragwitz deutlich bessere Vorhersagen als das bisher praktizierte, das die Luftbewegung als eine Überlagerung zeitlich periodischer Druckschwankungen plus einem zufallsbestimmten Rest auffasst und daraus eine Prognose herleitet. Diese theoretische Grundannahme würde zutreffen, wenn die Physik der Atmosphäre linear wäre (Wirkungen sind proportional den Ursachen). Das trifft definitiv nicht zu; denn Nichtlinearität ist eine notwendige Bedingung für Chaos, und die Navier-Stokes-Gleichungen, welche die Dynamik der Atmosphäre beschreiben, sind nichtlinear.

Ragwitz und Kantz haben das Verfahren zum Patent angemeldet.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

NEUROPSYCHIATRIE

Herzhormon dämpft Panik

Panikkranke erleben subjektiv höchste emotionale Erregung, während ihr Körper erstaunlich gelassen bleibt. Wie kommt es zu diesem Missverhältnis? Aus der Antwort ergeben sich Ansatzpunkte für neue Therapiemethoden.

Von Klaus Wiedemann, Holger Jahn, Falk Kiefer und Michael Kellner

Menschen, die unter einer Panikstörung leiden, packt immer wieder urplötzlich die nackte Angst. Sie meinen zu ersticken, fühlen sich schweißgebadet und glauben, dass ihr Herz bis zum Zerspringen rast, während der Blutandrang fast den Kopf sprengt. Sie fürchten verrückt zu werden oder zu sterben. Das Erleben übertrifft an Intensität oft sogar die Angst, die Patienten bei einem Herzinfarkt durchmachen.

Nach zehn Minuten bis einer Stunde hören solche Anfälle in der Regel ebenso schnell wieder auf, wie sie gekommen sind. Obwohl sich die Patienten danach völlig normal fühlen, macht ihnen die Ungewissheit das Leben schwer. Oft trauen sie sich kaum noch aus dem Haus und unter Menschen, weil die Angstattacken sie jederzeit aus heiterem Himmel wieder überfallen können. Die Panikkrankheit führt dadurch meist zu Vermeidungsverhalten und sozialem Rückzug.

Die Symptome lassen sich zwar mit Verhaltenstherapie oder Antidepressiva behandeln, doch die ärztliche Hilfe reicht ▶

Stressreaktion bei Panikattacken

Panikpatienten schütten bei Angstanfällen das Hormon ANP aus, das an vielen Stellen hemmend in die Hormonkaskade einer Stressreaktion eingreift.

THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

längst nicht aus, und nicht alle Patienten profitieren davon. Viele Betroffene greifen aus Verzweiflung zu Alkohol oder Beruhigungsmitteln und werden davon abhängig; oft entwickeln sie mit der Zeit Depressionen.

Normalerweise versetzt Angst den Körper in einen Alarmzustand. Adrenalin und andere Stresshormone sorgen dann für eine starke Durchblutung von Gehirn und Muskeln, sodass wir weglaufen oder uns mit aller Kraft zur Wehr setzen können. Bei Panikattacken geschieht nichts dergleichen. Die Kranken fühlen zwar ihr Herz jagen und den Puls rasen, als hätte ein Adrenalinstoß das sympathische Nervensystem in Hochspannung versetzt. Doch dies ist offenbar eine Fehlempfindung. Der Arzt misst meist nur einen mäßig erhöhten Puls wie bei einem leichten Ausdauertraining. Der Blutdruck steigt trotz der großen psychischen Erregung überhaupt nicht – desgleichen die Konzentration von Stresshormonen wie Cortisol im Blut.

Erleben und Körperzustand passen also nicht zusammen. Offenbar greift eine Erregung, die im Gehirn entsteht, nur minimal oder gar nicht auf den Körper über. Selbst äußerlich sieht man diesen Menschen einen Angstanfall auf den ersten Blick kaum an.

Herzhormon unterdrückt Wirkung von Stresssignalen

Neurobiologen und Stressforscher suchen seit langem nach einer Erklärung für diesen Widerspruch. Nun glauben wir die Lösung in einem Herzhormon gefunden zu haben, das man bisher in ganz anderen Zusammenhängen kennt. Zu Beginn eines Panikanfalls geben es die Herzmuskelzellen offenbar in großen Mengen ins Blut ab. Von dort gelangt das Hormon in die Nebennierenrinde und ins Gehirn, wo es die alarmierende Wirkung von Stresssignalen auf den Körper unterdrückt.

Naturgemäß ist es schwierig, Menschen während einer akuten Angstattacke medizinisch zu untersuchen. Das Paniksyndrom ist aber eine der wenigen psychischen Krankheiten, deren Symptome sich experimentell durch bestimmte Substanzen auslösen lassen – etwa Milchsäure beziehungsweise ihr Natriumsalz (Natriumlactat). Ein Großteil der Kranken reagiert auf die Infusion mit einem Panikanfall, während nur wenige Gesunde danach gesteigerte Angst empfinden. Durch Milchsäure erzeugte Anfälle gleichen physiologisch und psychisch in vielem dem natürlichen Erleben. Ärzte nutzen dies mitunter zur Diagnose und im Rahmen einer Verhaltenstherapie.

Bei künstlich ausgelösten Attacken lassen sich dann die verschiedensten physiologischen Parameter messen. Auf diese Weise stellten wir zu unserer großen Überraschung fest, dass Panikkranke bei einem Anfall das „Herzhormon“ ANP vermehrt ausschütten. Es ist schon seit fünfzehn Jahren bekannt – allerdings als Signalstoff, der Blutdruck und Nierentätigkeit reguliert. ANP steht für atriales natriuretisches Peptid. Das Hormon bildet sich nämlich in den Vorhöfen des Herzens (Atrien) und fördert die Ausscheidung von Natrium und damit die Harnbildung (Natriurese). Chemisch ist es ein Peptid, also eine kurze Kette aneinander geknüpfter Aminosäuren.

Seltsamerweise haben Panikkranke im symptomfreien Zustand viel weniger ANP im Blut als Gesunde. Zu Beginn eines Anfalls schnellt der Hormonspiegel dann aber auf mehr als das Doppelte desjenigen von Gesunden empor.

Allerdings löst das Herzhormon die Attacke nicht etwa aus. Im Gegenteil: Es wirkt ihr in vieler Hinsicht entgegen. So kann es verhindern, dass die Nebennieren das Stresshormon Cortisol ausschütten. Auch bei Gesunden ist es Teil eines natürlichen Regelkreises: Steigt der Cortisolspiegel im Blut, werden die Herzzellen hormonell aktiv, sodass Cortisol seine eigene weitere Freigabe hemmt. Bei einer Panikattacke dürfte diese Rückkopplung allerdings kaum eine Rolle spielen, da die Cortisolmenge ja gar nicht erst zunimmt.

Zudem greift ANP, wie wir nachweisen konnten, zentral in die Hormonkaskade einer normalen Stressreaktion ein. Diese beginnt mit der Abgabe eines Signalstoffs im Hypothalamus. Er aktiviert die Hypophyse (Hirnanhangdrüse), die daraufhin ein Hormon ausscheidet, das die Nebennieren anregt. Auch diese übergeordneten Hormone können die Herzmuskelzellen dazu veranlassen, ANP auszuschütten – und damit ihre eigene weitere Produktion hemmen.

Der oberste Signalgeber dieser Kaskade trägt den Namen CRH – für „Corti- ▶

cotropin Releasing Hormon“, also „Corticotropin freisetzendes Hormon“. Depressive und Patienten mit Angststörungen bilden wahrscheinlich zu viel davon. Vermutlich ist auch ein CRH-Schub der Auslöser einer Panikattacke. Das Hormon tritt ins Blut über, woraufhin das Herz, wie wir vermuten, ANP abgibt. Dieses verhindert dann im Gehirn, dass die weitere Stresshormonkaskade in Gang kommt, obwohl die erste Stufe schon ausgelöst wurde. Zudem hemmt ANP anscheinend übergeordnete Instanzen des sympathischen Nervensystems.

Doch das ist immer noch nicht alles. ANP kann auch die Angstempfindung mindern, indem es Erregungen in den Emotionszentren des Gehirns dämpft. Dies wiesen wir zunächst in Verhaltenstests an Nagetieren nach. Dabei setzten wir Ratten oder Mäuse zum Beispiel auf erhöhte schmale Bretter ohne Deckung, was ihnen nicht sehr behagt. Meist ducken sie sich an das eine Ende und wagen sich höchstens zögernd weiter vor. Hatten wir den Tieren aber vorher ANP ins Gehirn oder in die Bauchhöhle injiziert, benahmen sie sich weniger ängstlich.

Würden ANP-Injektionen auch bei Panikpatienten dafür sorgen, dass künstlich herbeigeführte Angstattacken milder verlaufen oder weniger leicht auslösbar sind? Genau dies konnten wir vor kurzem tatsächlich nachweisen.

Wir bildeten je eine Gruppe aus gesunden und kranken Versuchspersonen. Allen Probanden wurde in einem von zwei Tests vor dem chemischen Angstauslöser das Herzhormon intravenös injiziert, ohne dass sie wussten, in welchem. Daraufhin stellte sich in beiden Gruppen bei weniger Personen als im Kontrollversuch eine Panikattacke ein. Wenn trotzdem Angst aufkam, wurde sie als nicht so stark empfunden. Demnach unterdrückt ANP nicht nur die unteren Instanzen der Stresshormonkaskade, sondern trägt auch dazu bei, die Angst zu mildern und den Panikanfall wieder zu beenden.

Wie man inzwischen weiß, besitzt das Gehirn in mehreren Regionen Rezeptoren, also Erkennungsmoleküle, für ANP. Zudem stellte sich heraus, dass dieses Peptidhormon außer in den Herzmuskelzellen auch im Gehirn entsteht. Das passt zu einer anderen Erkenntnis, die Neurobiologen für eine der wichtigsten der letzten Jahre halten: dass CRH nicht nur als Hormon fungiert, sondern auch als Neurotransmitter, der Signale zwischen Nervenzellen überträgt. Demnach könnte ANP als großer Gegenspieler des CRH im Gehirn wirken.

Bei Panikkranken sind offenbar emotionssteuernde Systeme entgleist. Immerhin scheint ihr Organismus aber noch zu „wissen“, wie er bei einer Attacke erreicht, dass die belastenden körperlichen Reaktionen gering bleiben und der furchtbare Zustand schnell wieder aufhört. Diese natürliche Reaktion sollte man auch therapeutisch nutzen können. Die molekulare Struktur von ANP und sein Gen sind inzwischen bekannt. Außerdem wurde kürzlich ein eng verwandtes Hormon entdeckt, das aber entgegengesetzt wirkt, also Angst und Stressreaktion verstärkt. Diese Moleküle könnten Ausgangspunkte für eine völlig neue Medikamentenklasse werden, die Panikpatienten wirksame Hilfe verspricht.

Prof. Dr. Klaus Wiedemann, ***Dr. Holger Jahn***, ***Dr. Falk Kiefer*** *und* ***Priv.-Doz. Dr. Michael Kellner*** *sind Ärzte an der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf.*

QUANTENPARADOXIEN

Zeno und der Quanten-Schnellkochtopf

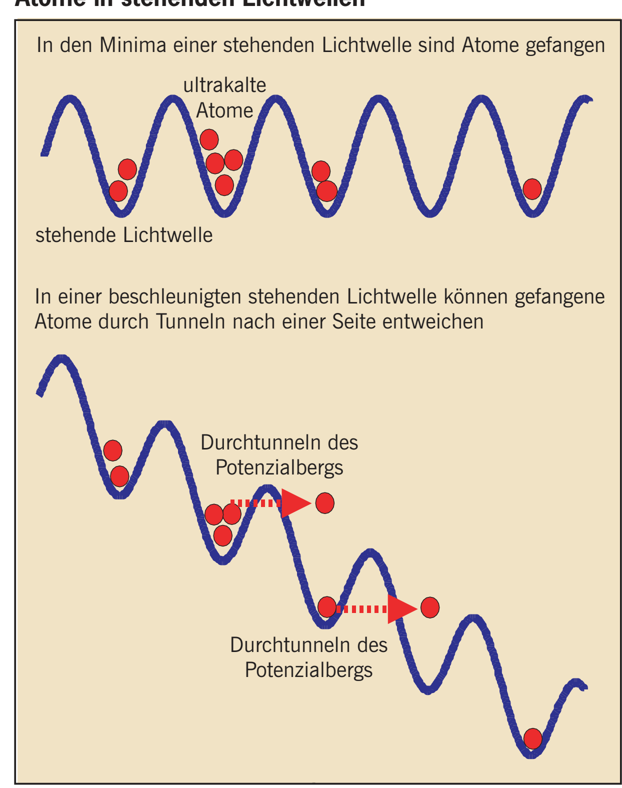
Einer Paradoxie der Quantenmechanik zufolge sollte sich der Zerfall eines Systems durch bloßes Beobachten aufhalten lassen. Experimente haben dies nun bestätigt – aber auch den umgekehrten Effekt nachgewiesen.

Von Oliver Morsch

„Niemand versteht die Quantenmechanik“, hat der berühmte theoretische Physiker Richard Feynman (Nobelpreis 1965) einmal gesagt. Nicht wenige Studenten dürften sich mit diesem Ausspruch des großen Meisters getröstet haben, wenn sie sich mit Folgerungen der Quantentheorie herumschlagen mussten, die dem gesunden Menschenverstand widersprechen. Zum Glück gibt es einige griffige Merksätze, die bestimmte Paradoxa der Quantenwelt prägnant umreißen. Einer davon lautet: „Ein Kochtopf, den man anschaut, kann nie kochen“ (im englischen Original „a watched pot never boils“).

Der Ursprung dieses Aperçus liegt in den 1970er Jahren. Damals leiteten Physiker an der Universität von Texas in Austin theoretisch ab, dass ein instabiles Quantensystem – beispielsweise ein radioaktiver Atomkern – am Zerfallen gehindert würde, wenn man nur oft genug hinsähe. Dass die Beobachtung ein Quantensystem beeinflusst, ist freilich eine der Grundaussa-

Atome in stehenden Lichtwellen



Die in dem Wellblech-Potenzial einer Stehwelle gefangenen kalten Atome können aus den Mulden heraustunneln, wenn das optische Gitter beschleunigt wird – was aus Sicht der Atome einem Kippen des Gitters gleich kommt.

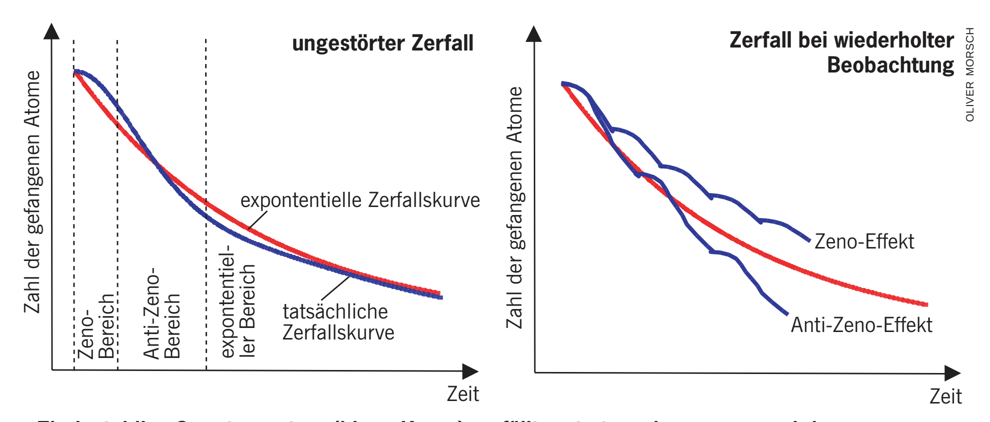
gen der Anfang des 20. Jahrhunderts von Max Planck, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger begründeten Theorie. Warum sollte also wiederholtes Beobachten nicht auch das Zerfallsverhalten ändern? Die theoretische Vermutung schien so einleuchtend, dass sie mit dem Spruch vom nicht kochenden Wassertopf flugs Eingang in das physikalische Gedankengut fand und auch gleich einen passenden Namen bekam: Quanten-Zeno-Effekt. Pate stand dabei der griechische Philosoph Zeno von Elea, dessen Lehre, dass Bewegung unmöglich sei, weil sich ein Körper zu jedem (hinreichend kurzen) Beobachtungszeitpunkt in Ruhe befände, nicht weniger paradox anmutet.

Nun haben wiederum Physiker an der Universität von Texas die theoretischen Schlussfolgerungen ihrer Vorgänger dem Praxistest unterzogen – und sind zu einem durchaus gemischten Ergebnis gekommen. Einerseits konnten sie erstmals experimentell nachweisen, dass es den Zeno-Effekt tatsächlich gibt. Andererseits jedoch machten die Versuche deutlich, dass auch das Gegenteil zutrifft: Häufige Beobachtung kann den Zerfall genauso gut beschleunigen – und das geschieht sogar viel häufiger als die Verlangsamung.

„Türmende“ Atome

Für sein Experiment verwendete das Team um Mark Raizen ultrakalte Atome mit Temperaturen von nur wenigen millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt, die sie in einem so genannten optischen Gitter gefangen hatten. Ein solches Gitter entsteht, wenn man zwei gegenläufige Laserstrahlen so überlagert, dass sich eine stehende Welle bildet. Gibt man kalte Atome in das Gitter, so sammeln sich diese in den Mulden des an ein Wellblech erinnernden Potenzials und bleiben, wenn die Mulden tief genug sind, darin gefangen. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik kann ein solches Atom dennoch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aus dem Potenzialtrog entkommen, indem es dessen Wand „durchtunnelt“.

Beschleunigt man nun die Stehwelle – was aus der Sicht der Atome dem Kippen des „Wellblechpotenzials“ gleichkommt –, so erniedrigt sich die Potenzialbarriere auf einer Seite, und das Tunneln in diese Richtung wird erleichtert. Da jedes Atom mit derselben Wahrscheinlichkeit aus seinem Gefängnis entfliehen kann, sollten umso weniger Atome durch die Potenzialbarrieren tunneln, je weniger sich noch in den Mulden befinden. Das bedeutet, dass die Abnahme an noch gefangenen Atomen einer (inversen) Exponentialfunktion gehorcht. ▶



Ein instabiles Quantensystem (blaue Kurve) zerfällt erst etwas langsamer und dann für einige Zeit schneller als ein klassisches System mit exponentiellem Zerfall (rote Kurve). Der „langsame" Teil ist für den Zeno-Effekt verantwortlich, der „schnelle" Teil für den Anti-Zeno Effekt (links). Beobachtet man das System wiederholt während der „Zeno-Phase", so wird sein Zerfall verlangsamt, während Messungen mit etwas längerem zeitlichen Abstand das System schneller zerfallen lassen (rechts).

Ein solcher exponentieller Zerfall tritt in vielen physikalischen und biologischen Systemen auf.

Schon 1997 hatten Raizen und seine Mitarbeiter allerdings nachgewiesen, dass ganz am Anfang der Beschleunigungsphase die Zahl der gefangenen Atome weniger stark abnimmt, als das Exponentialgesetz erwarten lässt. Dies liegt daran, dass in der Quantenwelt die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation gilt, wonach Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens nie gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit messbar sind. Demnach „weiß" ein soeben beschleunigtes Atom für kurze Zeit nicht, ob es sich noch in der Potenzialmulde befindet oder sie durch Tunneln bereits verlassen hat. Beobachtet man nun das Atom innerhalb dieser „unschlüssigen" Phase, indem man beispielsweise seine Position bestimmt, so beginnt das Spiel von vorne, da eine Messung nach den Gesetzen der Quantenmechanik gleichsam die Karten neu mischt. Das Teilchen wird also bei weiterer Beschleunigung erneut zögern, dem exponentiellen Zerfallsgesetz zu folgen.

Wiederholt man nun die Positionsbestimmung des Atoms in regelmäßigen Abständen, so kommt dieses nie dazu, die Potenzialbarriere „normal" zu durchtunneln: Der Zerfall ist durch die Messungen verlangsamt worden. Genau dies beobachteten die Physiker aus Austin, und bis hierher stimmt ihr Befund mit dem Kochtopf-Merksatz überein.

Doch das änderte sich, als die Forscher die Abstände zwischen den Messungen etwas verlängerten: Anstatt das Tunneln der Atome zu verlangsamen, schienen sie es nun zu beschleunigen – die Abnahme der gefangenen Atome überholte sogar die Exponentialkurve! Aus dem Kochtopf, der nie kocht, war ein Quanten-Schnellkochtopf geworden. Genau dies hatten allerdings bereits letztes Jahr Forscher des Weizmann-Instituts in Rehovot (Israel) vorhergesagt.

Tatsächlich ist dieser „Quanten-Anti-Zeno-Effekt" im Grunde nicht überraschend, hängt er doch gleichfalls mit Abweichungen vom exponentiellen Zerfall zusammen. Auf die anfängliche Phase verlangsamten Tunnelns folgt nämlich zum Ausgleich eine kurzfristige jähe Abnahme der Zahl der noch gefangenen Atome. Beobachtet man die Teilchen gegen Ende dieser Phase und wiederholt den Vorgang, so zwingt man sie, immer wieder den beschleunigten Zerfall zu durchlaufen, anstatt letztendlich in den normalen exponentiellen Abschnitt überzugehen. Deshalb entweichen im Mittel mehr gefangene Atome als ohne Messung. Nun ist der Zerfallsabschnitt, der zum Anti-Zeno-Effekt führt, länger als der für den Zeno-Effekt verantwortliche. Darum sollte der Anti-Zeno-Effekt häufiger auftreten.

Warum wurden die beiden Phänomene nicht schon früher beobachtet – beispielsweise beim radioaktiven Zerfall? Das hat einen einfachen Grund: Der nichtexponentielle Abschnitt der Zerfallskurve beträgt in solchen Systemen weniger als den millionstel Teil einer milliardstel Sekunde und ist damit viel zu kurz für eine vernünftige Messung. In den optischen Gittern der amerikanischen Forscher dagegen dauerte diese Phase knapp eine Mikrosekunde – also eine Milliarde Mal so lang – und war damit problemlos beobachtbar.

Die Studenten der Quantenphysik sind jetzt also um einen Merksatz ärmer. Dafür können sie in der nächsten Prüfung auf die Frage: „Wird der Zerfall eines Quantensystems durch Beobachtung verlangsamt oder beschleunigt?" mit einem klaren „Je nachdem!" antworten. Bei der Begründung werden sie sich allerdings etwas mehr anstrengen müssen.

Oliver Morsch *ist Physiker und forscht als Postdoktorand an der Universität Pisa.*

MIKROBIOLOGIE

Die erstaunliche Karriere des Pest-Erregers

Keine andere Krankheit hat in der Menschheitsgeschichte so viele Opfer gefordert wie die Pest. Die Entzifferung der Erbinformation ihres Erregers *Yersinia pestis* liefert nun Einblicke in die verblüffende Evolution dieses gefürchteten Bakteriums.

Von Petra Jacoby

Häufige Pestepidemien verbreiteten im Mittelalter in Europa Angst und Schrecken und rafften immer wieder bis zu einem Drittel der Bevölkerung dahin. Obwohl man die Krankheit heute gut mit Antibiotika behandeln kann, mahnen Pestausbrüche wie zuletzt 1994 in Indien, dass die Seuche keineswegs endgültig besiegt ist. Außerdem gilt die einstige Geißel der Menschheit heute als eine der brisantesten potenziellen Biowaffen in der Hand von Terroristen.

Auslöser der Krankheit ist das Bakterium *Yersinia pestis*, benannt nach dem französischen Arzt und Bakteriologen Alexandre Yersin, der es 1894 in Südchina entdeckte. Seine eigentlichen Wirte sind kleine Nagetiere, insbesondere Ratten, die durch Flohstiche infiziert wer-

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

Mit einer fantastischen Montur suchten sich Pestdoktoren vor einer Ansteckung mit der tödlichen Krankheit zu schützen.



GRANGER COLLECTION

den. Wenn beim Blutsaugen Pest-Erreger in den Flohdarm geraten, vermehren sie sich dort so stark, dass sie die Eingeweide schließlich verstopfen. Bei einer erneuten Blutmahlzeit erbricht der Floh daher erst einmal einen Teil der Bakterien in die Stichwunde, um in seinem Verdauungstrakt Platz für neue Nahrung zu schaffen. Auf diese Weise kann sich *Y. pestis* sehr schnell verbreiten. Da die Nagetiere in der Regel resistent sind, bleibt der Kreislauf zwischen ihnen und den Flöhen gewöhnlich in sich geschlossen.

Manchmal treten aber anfällige Nagerpopulationen auf, in denen die Tiere rasch an den Krankheitsfolgen verenden. Dann besteht die Gefahr, dass Flöhe auf Grund von Nahrungsmangel auch auf den Menschen überspringen und ihn infizieren.

Die Symptome der Pest sind gravierend und führen unbehandelt in den meisten Fällen zum Tod. Die Bakterien siedeln sich zunächst in den Lymphknoten an und führen hier zu starken Schwellungen und Eiterungen: Charakteristika der Beulenpest. Nach Durchbrechen der Lymphbarriere können die Mikroben über die Blutbahn auch in die Lunge gelangen. Die resultierende Lungenpest ist dann durch Tröpfcheninfektion direkt von Mensch zu Mensch übertragbar.

Y. pestis hat sich vermutlich erst vor wenigen tausend Jahren aus dem harmlosen Durchfallerreger *Y. pseudotuberculosis* entwickelt. Beide gehören zu den Enterobacteriaceen. Krankheitserreger dieser Gruppe besiedeln normalerweise den Verdauungstrakt von Wirbeltieren und rufen relativ harmlose Darmentzündungen hervor. Das Pest-Bakterium fällt mit seiner Spezialisierung auf Körperflüssigkeiten und Gewebe von Säugetieren sowie auf den Darm von Flöhen völlig aus dem Rahmen. Daher haben sich Mikrobiologen schon lange gefragt, wie ein derart drastischer Wechsel der Überlebensstrategie in so kurzer Zeit stattfinden konnte.

Wechsel der Überlebensstrategie

Mit der vollständigen Entzifferung des Erbguts von *Y. pestis* ist es Julian Parkhill und seinen Kollegen am Sanger Centre in Cambridge (England) nun gelungen, entscheidend zur Klärung dieses Rätsels beizutragen (*Nature, Bd. 413, S. 523*). Als einer der Gründe für die rasante Evolution des Pest-Erregers erwies sich dabei die ungewöhnlich häufige Umlagerung ganzer DNA-Blöcke im Genom des Bakteriums. Durch solche Transpositionen können sich schnell völlig neue Eigenschaften entwickeln. ▶


CNRI / SPL / AG. FOCUS

Erreger der Pest sind Bakterien der Art *Yersinia pestis*.

Die wichtigste Rolle für die Entwicklung von *Y. pestis* spielte allerdings der so genannte horizontale Gentransfer. Dabei bereichern die Mikroben ihr Erbgut, indem sie Gene von artfremden Organismen übernehmen. Als Überträger fungieren oft Viren. Sie können beim Befall einer Bakterienzelle DNA aus deren Genom aufnehmen und sie weitergeben, wenn sie eine andere Bakterienart infizieren. Anhand typischer Abschnitte, die solche „fremde" DNA in der Regel flankieren, konnten Parkhill und seine Kollegen die über horizontalen Transfer erworbenen Gene bei *Y. pestis* aufspüren.

Tatsächlich passen viele davon zu der spezifischen Lebensweise des Pest-Bakteriums. So tragen einige die Bauanleitung für insektizide Substanzen. In der Abfolge ihrer „Buchstaben" (der Nucleotidsequenz) ähneln sie Toxin-Genen verschiedener Bakterien und Viren, die speziell Insekten befallen – beispielsweise *Serratia entomophila* und Baculoviren. Von ihnen stammen wahrscheinlich mehrere Gene, die es *Y. pestis* ermöglichen, als Parasit im Flohdarm zu hausen.

Weiterhin hat der Pest-Erreger aus noch unbekannten Quellen zahlreiche Gene für Oberflächen-Proteine erworben. Sie könnten für sein aggressives Verhalten gegenüber Säugetieren und dem Menschen verantwortlich sein, indem sie das Bakterium befähigen, die Abwehrmechanismen des Wirts zu unterlaufen.

Während seiner Evolution hat *Y. pestis* aber auch große Teile seiner Erbinformation verloren. So beherbergt das Bakterium eine ungewöhnlich hohe Anzahl so genannter Pseudogene: Vier Prozent seines Genoms bestehen aus solchen einstmals aktiven Erbfaktoren, die durch Mutationen inzwischen unbrauchbar geworden sind. Die Degeneration zeugt davon, dass das betreffende Gen schon seit längerem nicht mehr benötigt und nur noch quasi als evolutionärer Schrott mitgeschleppt wird. Als solcher eignet es sich aber hervorragend dazu, die Lebensweise der Ahnen des Pest-Erregers zu erforschen.

So lassen die Pseudogene von *Y. pestis* noch deutlich erkennen, dass es von einem Durchfallerreger abstammt. Viele von ihnen haben funktionierende Gegenstücke bei Darmbakterien wie *Y. pseudotuberculosis* und *Escherichia coli*. Dort codieren sie für Faktoren, die eine spezifische Einnistung im Wirbeltier-Verdauungstrakt ermöglichen. Computergestützte Sequenzvergleiche mit den bereits bekannten Teilen des *Y. pseudotuberculosis*-Genoms zeigten, dass bei ihm noch 95 Prozent der *Y. pestis*-Pseudogene ihre vorgesehene Aufgabe erfüllen.

Die Inaktivierung unnötiger Gene tritt auch bei anderen Organismen auf. Ein extremes Beispiel ist der Lepra-Erreger *Mycobacterium leprae*. Bei ihm besteht über die Hälfte des Genoms aus Pseudogenen, die im nah verwandten Tuberkel-Bakterium *M. tuberculosis* großteils noch funktionsfähig sind (*Nature, Bd. 409, S. 1007*).

Mit seiner Fähigkeit zur raschen genetischen Veränderung und Aneignung fremden Erbmaterials bleibt *Y. pestis* ein bedrohlicher Erreger, der plötzlich neue, noch gefährlichere Stämme bilden könnte. Die genaue Kenntnis des Genoms sollte jedoch helfen, in diesem Falle rasch Gegenmaßnahmen zu finden. Ähnliches gilt für das denkbare Szenario, dass Terroristen antibiotikaresistente Pest-Bakterien konstruieren und für Anschläge missbrauchen.

Petra Jacoby *ist Diplombiologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.*

UMWELTCHEMIE

Abwasserreinigung mit Sonnenlicht

Neu entwickelte Katalysatoren können mit Hilfe von normalem Sonnenlicht auch hartnäckige Verunreinigungen im Abwasser zersetzen, mit denen die Mikroben in Kläranlagen nicht fertig werden.

Von Michael Groß

Von den unzähligen neuartigen chemischen Verbindungen, die im Laufe des 20. Jahrhunderts den Weg aus den Syntheselabors in die Fabriken oder Haushalte gefunden haben, beenden viele ihre Laufbahn im Abwasser – als Verunreinigung oder gar Schadstoff. Mit manchen kommen die Bakterien in den biologischen Kläranlagen gut zurecht, an andere haben sie sich über die Jahre hinweg angepasst, aber einige organische Verbindungen sind auch für die hartgesottensten Mikroben unverdaulich. Dazu zählen etwa chlorierte Aromaten: benzolähnliche Verbindungen mit einem oder mehreren Chloratomen.

Helfer beim Abbau von Schadstoffen

Eine Möglichkeit, den abwasserreinigenden Mikroorganismen unter die Arme zu greifen, wäre die Zugabe eines geeigneten Katalysators. Katalysatoren können eine Reaktion, die sonst sehr langsam (oder sogar unendlich langsam, also nie) ablaufen würde, derart beschleunigen, dass sie in einer für praktische Zwecke nützlichen Zeitspanne zum Ende kommt. In der Zelle leisten das die Enzyme, von denen sich inzwischen auch die chemische Industrie einige ausgeborgt hat. Doch häufiger bringen Metalle und Metallverbindungen großchemische Prozesse in Schwung.

Besonders ausgeklügelte Katalysatoren können überdies eine Energiequelle anzapfen und sie für die Reaktion nutzbar machen. Handelt es sich dabei um (Sonnen-)Licht, spricht man von Photokatalysatoren. Auch sie gibt es in einer biochemischen Version (beispielsweise repariert die DNA-Photolyase defekte Erbsubstanz mit Hilfe von Licht) und in einer anorganisch-technischen.

Einer der am besten untersuchten anorganischen Photokatalysatoren ist das Titandioxid. Diese ungiftige Verbindung, die auch als weißes Pigment geschätzt wird, kann bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht unerwünschte organische ▶

Verbindungen mittels Luftsauerstoff zersetzen, also chlorierte Kohlenwasserstoffe zum Beispiel in Kohlendioxid, Wasser und Salzsäure zerlegen.

Diese Fähigkeit verdankt Titandioxid dem Umstand, dass es ein Halbleiter ist. Bei Lichteinfall wird ein Elektron aus einem niedrigen Energieniveau (dem Valenzband) über die so genannte Bandlücke hinweg in einen höheren Zustand (das Leitungsband) gehievt; das verbliebene „Loch“ im Valenzband sowie das angehobene Elektron können dann jeweils chemische Reaktionen auslösen. Nun ist allerdings die Bandlücke in diesem Fall so groß, dass die Energie von gewöhnlichem Licht mit Wellenlängen zwischen 400 und 800 Nanometern für den Hebevorgang nicht ausreicht. Deshalb wirkt Titandioxid lediglich im ultravioletten Wellenlängenbereich als Photokatalysator.

UV-Strahlung wird allerdings durch Glas, Wasser und Luft relativ stark absorbiert, sodass vor allem im Winter nur wenig am Erdboden ankommt. Mehrere Teams befassen sich deshalb mit der Entwicklung von Photokatalysatoren, die organische Schadstoffe auch mit sichtbarem Licht zerlegen können. Dazu gehören insbesondere die Arbeitsgruppen von Horst Kisch an der Universität Erlangen-Nürnberg und Wilhelm Maier am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim. Ihnen ist es nun gelungen, den Aktivitätsbereich von Titandioxid in den sichtbaren Teil des Spektrums auszudehnen. Dazu setzten sie dem Halbleiter in geringen Mengen Chloride von Kobalt, Nickel oder Edelmetallen zu (*Chemistry European Journal, Bd. 6, S. 379*). Offenbar können diese Verbindungen wie Antennen die Energie des sichtbaren Lichts auffangen und gebündelt an das Titandioxid weiterleiten. Dadurch ließ sich die Obergrenze des nutzbaren Wellenlängenbereichs von unter 400 auf fast 600 Nanometer anheben. Denselben Effekt erzielten die Forscher auch durch Einbau geringer Mengen Kohlenstoff in das Titandioxid (*Applied Catalysis B: Environmental, Bd. 32, S. 215*).

Einen anderen Weg gingen Maier, inzwischen an der Universität Saarbrücken, und seine früheren Kollegen am Mülheimer MPI in ihrer jüngsten Studie, bei der sie mit Chlorphenol als Test-Schadstoff arbeiteten. Statt Titandioxid mit allen möglichen Hilfsmitteln zu spicken, suchten sie nach Photokatalysatoren auf der Basis völlig anderer Grundsubstanzen. In einer Art Rasterfahndung testeten sie die Wirksamkeit einer ganzen Bibliothek verschiedener Metalloxide mit diversen Zusatzstoffen durch – jeweils 45 auf einen Streich in einem Raster von 45 Glasfläschchen (*Angewandte Chemie, Bd. 113, Nr. 17, S. 3258*).

Mehr als eine Geschmacksfrage

Fündig wurden die Forscher bei den Oxiden der Metalle Zinn und Wolfram. Diese zeigen mit den richtigen Hilfsstoffen eine photokatalytische Aktivität im sichtbaren Spektrum, die zwar nicht ganz an die der Titandioxide heranreicht, aber durchaus für Anwendungen interessant werden könnte. Maier und Kollegen vermuten deshalb, dass es noch viele weitere anorganische Photokatalysatoren zu entdecken gibt.

Darunter sollte sich auch der eine oder andere finden, der den Kläranlagen bei der Beseitigung biologisch nicht abbaubarer Schadstoffe helfen könnte. Andere Umweltprobleme ließen sich mit solchen Katalysatoren gleichfalls leichter bewältigen. Dazu gehört sowohl die Sanierung kontaminierten Erdreichs als auch die unerwünschte Bildung chlorierter Aromaten bei der Aufbereitung von Trinkwasser aus Uferfiltrat, bei der Chlor zur Desinfektion benutzt wird. Chlorphenole wie das von Maier und Kisch untersuchte verderben den Niederländern derzeit den Geschmack ihres Tees, wenn sie ihn mit solchem Wasser zubereiten. Dem abzuhelfen wäre nicht nur eine Geschmacksfrage. ■

***Michael Groß** ist Biochemiker und Honorary Science Writer in Residence am Birkbeck College in London.*

Nachgehakt

Bröckelnde Fronten in der Embryodebatte

Als Ende November letzten Jahres die Meldung Schlagzeilen machte, Wissenschaftler der US-Firma Advanced Cell Technology hätten die ersten geklonten menschlichen Embryonen erzeugt, schienen die Albträume all derer Wirklichkeit geworden, die in den Gentechnologen schon immer potenzielle Schöpfer von Frankenstein-Monstern vermutet hatten. Doch wer einen Sturm der Entrüstung in den Medien erwartete, sah sich getäuscht. Zwar waren die Kommentare ausnahmslos ablehnend, blieben aber angesichts der Tragweite des Tabubruchs erstaunlich sachlich und nüchtern – keine Spur jenes Schaums vor dem Mund, der manche Stellungnahmen in der Debatte um Klonen und pränatale Diagnostik im vergangenen Jahr unangenehm geprägt hatte.

Empörung flammte stattdessen auf Seiten der Wissenschaftler auf. Die schärfsten Worte fand Nobelpreisträgerin Christiane Nüsslein-Volhard, indem sie die Arbeiten ihrer amerikanischen Kollegen als „verwerflich“ brandmarkte.

Allerdings richtete sich die Kritik deutscher Forscher zum großen Teil gegen die noch dürftigen wissenschaftlichen Ergebnisse. Außerdem erklärte sich die stark emotionale Reaktion sicher auch aus der Befürchtung, das skrupellose Vorpreschen einer um Geldgeber buhlenden US-Firma könne das öffentliche Klima hier zu Lande derart verschlechtern, dass selbst bescheidene Untersuchungen – etwa an importierten Stammzellen – nicht mehr möglich wären.

Doch diese Angst war unbegründet: Der öffentliche Aufschrei blieb aus. Stattdessen kamen sogar aus dem bis dahin monolithischen kirchlichen Ablehnungsblock ungewöhnliche Töne. In einem Spiegel-Interview distanzierte sich der evangelische Theologe Richard Schröder vom offiziellen Standpunkt der beiden großen christlichen Konfessionen, dass eine befruchtete Eizelle bereits ein vollwertiger Mensch und die Präimplantationsdiagnostik aus ethischen Erwägungen grundsätzlich abzulehnen sei.

Über ein Jahr lang haben Hardliner auf beiden Seiten versucht, ihre Positionen abzustecken, und in einem Pseudodialog stur aneinander vorbei geredet. Nun endlich scheinen sich die Fronten aufzuweichen, und ein echter Diskurs könnte beginnen. Das Ziel muss ein breiter gesellschaftlicher Konsens sein, der den Missbrauch des menschlichen Erbguts verhindert und die wohlverstandene Würde auch des werdenden menschlichen Lebens schützt, aber nicht alle Chancen, mit gentechnischen Methoden menschliches Leid zu lindern, von vorneherein vereitelt. Die Hoffnung wächst, dass wider alles Erwarten ein solcher wohlabgewogener Kompromiss zu Stande kommt.

Gerhard Trageser

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Klimawandel auf dem Mars?

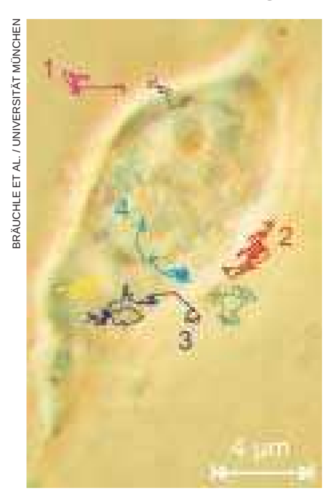
Diese bizarre Landschaft ist ein rund drei mal fünf Kilometer großer Teil des ewigen Eises am Südpol des Mars. Allerdings handelt es sich um gefrorenes Kohlendioxid statt Wasser. Das zernarbte Relief bildet sich durch Sublimation und erneutes Auskondensieren des Trockeneises während des 687 Erdtage dauernden Marsjahres. Staub, den die gewaltigen Marsstürme bis an die Pole tragen, färbt die Schichtränder dunkel. Das Bild gehört zu einer Serie von Aufnahmen der Mars Orbiter Camera, die Forscher bei Malin Space Science Systems nun ausgewertet haben. Dabei zeigte sich, dass die Eisdecke zusehends schrumpft – um etwa drei Meter pro Marsjahr. Demnach bahnt sich ein Klimawandel auf dem roten Planeten an, vermutlich ausgelöst durch einen Anstieg der Sonnenintensität. Setzt sich der Vorgang fort, nähme die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre schon in zehn Jahren um etwa ein Prozent zu, was einen Treibhauseffekt und damit eine weitere Erwärmung zur Folge hätte. Langfristig könnte sich so der Luftdruck auf dem Mars verdoppeln.

NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS

VIROLOGIE

Drehbuch einer Infektion

Erstmals ließ sich das Eindringen von Viren in eine lebende Zelle in Echtzeit filmen. Forscher um Christoph Bräuchle von der Universität München markierten dafür einzelne solche Krankheitserreger mit jeweils nur einem einzigen Molekül eines fluoreszierenden Farbstoffs. Bei dieser minimalen Einfärbung wird die Wechselwirkung zwischen Virus und Zelle nicht beeinflusst. Die Münchener Wissenschaftler konnten das Fluoreszenzsignal des Markermoleküls mittels hoch empfindlicher Einzelmolekülspektroskopie in Echtzeit verfolgen – bei einer Ortsauflösung von etwa vierzig Nanometern (milliardstel Metern) und mit einer zeitlichen Genauigkeit von zehn Millisekunden. So ließen sich die einzelnen Stadien einer Virusinfektion im Detail beobachten: die Bewegung des Virus auf die Zelle zu (1, siehe Bild), die Bindung an einen Rezeptor an der Zelloberfläche (2), der Weg des Virus in die Zelle (3) und sein Eindringen in den Zellkern (4). Die Möglichkeit, Viren beim Infektionsvorgang zuzusehen, eröffnet faszinierende Perspektiven. So könnte sie helfen, das Eindringen von Keimen in die Zelle zu blockieren, oder dazu beitragen, den Einsatz von Viren als Genfähren bei der Gentherapie zu optimieren. (*Science, Bd. 294, S. 1929*)



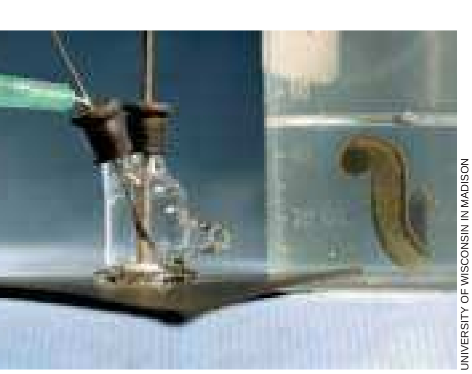
BRÄUCHLE ET AL. / UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Bahnen einzelner Viren auf ihrem Weg zum Zellkern

MEDIZIN

Egel ohne Ekel

Viele Menschen schütteln sich beim Gedanken an Blutegel. Doch die Parasiten bewähren sich seit Jahrtausenden als Helfer beim therapeutischen Aderlass. Am Körper angesetzt, nehmen sie überschüssiges Blut auf und geben mit ihrem Speichel gerinnungshemmende Wirkstoffe ab. So lassen sich etwa verstopfte Venen nach Operationen öffnen. Doch jetzt bekommt der natürliche Schröpfkopf künstliche Konkurrenz. Forscher der Universität von Wisconsin in Madison haben ein mechanisches Gegenstück entwickelt, das einige entscheidende Vorteile besitzt. Während Egel nur so lange Blut saugen, bis ihr Appetit gestillt ist, und dann abfallen, zeigt sich ihr mechanisches Ebenbild unersättlich. Außerdem ist es steril und kann in tiefere Bereiche unter der Haut zu dickeren Adern vorstoßen. Gerinnungshemmende Stoffe lassen sich zudem kontrollierter an das Gewebe abgeben. „Der größte Vorteil des Geräts ist aber vielleicht, dass es eben kein Egel ist“, meinen die Wissenschaftler. Damit entfällt der Widerwille, den viele Patienten beim Anblick der Blutsauger empfinden.

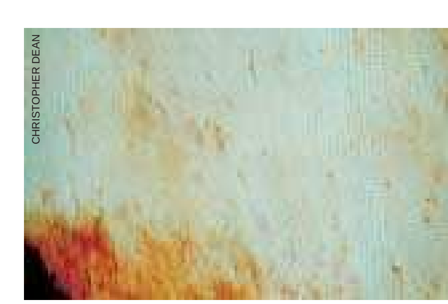

UNIVERSITY OF WISCONSIN IN MADISON

Der künstliche Blutegel (links) ist weniger abstoßend als sein tierisches Vorbild (im Kolben).

PALÄANTHROPOLOGIE

Hominiden auf den Zahn gefühlt

Die lange Kinder- und Jugendzeit unterscheidet den modernen Menschen von anderen Primaten – neben dem relativ großen Gehirn und dem aufrechten Gang. Doch wann in der menschlichen Evolution bildete sich diese lange Entwicklungsperiode heraus? Ein internationales Forscherteam um den Biologen Christopher Dean vom University College London hat in den Zähnen fossiler Hominiden, moderner Menschen und Menschenaffen nach der Antwort gesucht. Mühsam zählten die Wissenschaftler unter dem Mikroskop die täglichen Wachstumsstreifen des Zahnschmelzes und ermittelten so ihre durchschnittliche Dicke. Die lange Kindheit des modernen Menschen bedingt ein sehr langsames Zahnwachstum. Ein entsprechendes Muster fand sich erst beim „klassischen“ Neandertaler, der bereits ein fast ebenso großes Gehirn hatte wie wir. Das verzögerte Heranwachsen ist demnach ein ziemlich neues menschliches Charakteristikum, das sich erst vor ungefähr 120 000 Jahren herausgebildet hat. Bislang gingen Anthropologen davon aus, dass schon der bis vor etwa 500 000 Jahren lebende *Homo erectus* eine derart ausgedehnte Entwicklungsphase besaß, da er dem *Homo sapiens* etwa in Bezug auf Körpergewicht und -proportionen stark ähnelte. (*Nature, Bd. 414, S. 628*)


CHRISTOPHER DEAN

Fossiler Zahnschmelz mit täglichen Wachstumsstreifen

VERHALTENSBIOLOGIE

Mehr als sture Nachahmer

Schimpansen können anscheinend nicht nur einfache Handlungsmuster nachahmen, sondern sind auch zu geistig anspruchsvolleren Leistungen in der Lage. Darauf deuten systematische Untersuchungen an drei jungen, von Menschenhand aufgezogenen Schimpansen hin, die Forscher um David F. Bjorklund von der Florida Atlantic University in Boca Raton durchgeführt haben. Bei insgesamt sieben Aufgaben sollten die Affen mit verschiedenen Gegenständen kurze Handlungen ausführen, ohne dafür etwa durch Leckerbissen belohnt zu werden. In einem Fall erhielten sie eine kleine offene Holzkiste, mit der sie durch einen am Boden angebrachten Mechanismus Musik abspielen konnten. Dazu mussten sie mit Hilfe eines Aluminiumrohres eine CD in die Verankerung herunterdrücken, was einige Geschicklichkeit erforderte. Auch als den Schimpansen statt der Holzkiste eine schmale Röhre präsentiert wurde, die den gleichen Mechanismus enthielt, versuchten alle drei, die Musik mit dem Aluminiumstab in Gang zu bringen. Bei den anderen Aufgaben agierten sie ähnlich clever. Demnach sind unsere engsten Verwandten durchaus fähig, einmal Gelerntes zu verallgemeinern. (*Animal Cognition 10.1007/s10071-001-0124-5*)

PHYSIK

Zufallslaser spüren Hitze

Einen Laser, dessen Licht mit der Temperatur variiert, haben Physiker vom Europäischen Labor für nichtlineare Spektroskopie in Florenz entwickelt. Während üblicherweise zwei gegenüberstehende Spiegel als Resonatoren dienen, verwendeten Diederik Wiersma und Stefano Cavalieri kleine Glaskügelchen, zwischen denen das Licht ziellos umherirrt. Dazwischen befindet sich ein Farbstoff als aktives Lasermedium, verteilt in einem Flüssigkristall. Dessen langgestreckte Moleküle ändern abhängig von der Temperatur ihre Orientierung und bestimmen so, wie lange ein Lichtstrahl zwischen den Kügelchen verweilt. Damit ändert sich auch das Spektrum des „Zufallslasers“: Bis 35 Grad Celsius emittiert er intensives Licht in einem relativ engen Wellenlängenbereich. Das Spektrum verbreitert sich beim weiteren Erwärmen. Ab etwa 42 Grad Celsius fällt die Intensität abrupt ab, da der Flüssigkristall eine neue Struktur annimmt. Durch verschiedene Kombinationen aus Glaskörpern und Flüssigkristallen könnten sich Laser mit den unterschiedlichsten spektralen Eigenschaften bauen lassen – etwa für temperaturempfindliche Bildschirme oder für die Temperaturmessung aus großen Entfernungen. (*Nature, Bd. 414, S. 708*)



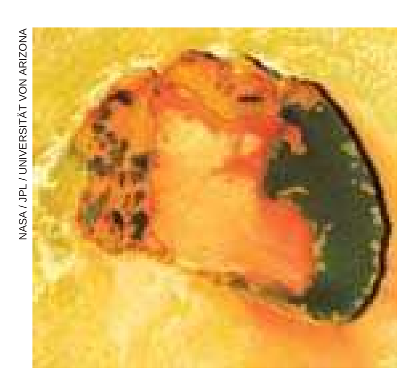
DIEDERIK WIERSMA, EUROPÄISCHES LABOR FÜR NICHTLINEARE SPEKTROSKOPIE, FLORENZ

Zutaten des Zufallslasers: Glaskügelchen und ein Farbstoff in Flüssigkristallen

PLANETOLOGIE

Io in Aktion

Der Jupitermond Io ist der vulkanisch aktivste Ort in unserem Sonnensystem. Anders als bei der Erde liefern jedoch nicht zerfallende radioaktive Elemente im Innern die nötige Wärme. Io wird vielmehr von außen aufgeheizt: Die gewaltigen Gezeitenkräfte des Jupiters walken den Mond regelrecht durch. Deshalb hat er auch kein eigenes Magnetfeld: Die dafür erforderlichen konvektiven Umwälzungen in seinem Inneren finden nicht statt. Allerdings steht er unter dem Einfluss der starken magnetischen Feldlinien des Jupiters. Neue Messungen der Jupiter-Sonde Galileo zeigen nun, dass vulkanisch aktive Zonen auf Io das Magnetfeld beeinflussen. Damit könnten sich aufsteigende Magmasäulen im Mantel aufspüren und neue Erkenntnisse über das Innere des Mondes gewinnen lassen, meint Margaret Kivelson von der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Außer Daten über das Magnetfeld lieferte Galileo auch spektakuläre Aufnahmen. So präsentiert sich Tupan Pantera, eine etwa 75 Kilometer breite vulkanische Senke, die nach einem brasilianischen Donnergott benannt ist, in einem regelrechten Farbenmeer. Wie die orangeroten, grünen, gelben und schwarzen Tönungen bei Reaktionen von geschmolzenem Gestein mit Schwefelverbindungen entstehen, ist allerdings noch weit gehend ungeklärt.



NASA / JPL / UNIVERSITÄT VON ARIZONA

Der Vulkan Tupan Pantera auf Io zeigt ein prächtiges Farbenmuster.

ZOOLOGIE

Gecko im Groschenformat

Mit nur 16 Millimetern Länge findet die Jaragua-Eidechse (*Sphaerodactylus ariasae*) bequem auf einem Geldstück Platz. Blair Hedges von der Pennsylvania State University in University Park und Richard Thomas von der Universität von Puerto Rico in San Juan entdeckten den Winzling auf der karibischen Insel Beata vor Hispaniola. Er teilt sich den Ruhm, die kleinste Echse der Welt zu sein, mit der Gecko-Art *Sphaerodactylus parthenopion*, die 1965 auf den Britischen Jungferninseln gefunden wurde. *S. arisiae* lebt im feuchten Laub am Boden von Trockenwäldern. „Andernfalls würde die winzige Echse wegen ihrer im Vergleich zum Volumen großen Oberfläche durch die starke Verdunstung sofort zu Grunde gehen“, erklärt Hedges. Die kleinsten Vertreter einer Tiergruppe treten oft auf Inseln auf; denn hier ist der Druck durch Räuber oder Konkurrenten geringer, sodass sich auch auf den ersten Blick benachteiligte Organismen durchsetzen und ihre Nische finden können. Die karibische Inselwelt weist – wie andere so genannte „Hotspots der Biodiversität“ – eine besonders große Artenvielfalt auf. Diese ist durch die zunehmenden Umweltzerstörungen allerdings stark gefährdet – viele Arten könnten so ausgelöscht werden, bevor sie überhaupt entdeckt sind. *(Journal of Caribean Science, Bd. 37, S. 168)*



BLAIR HEDGES

Kaum größer als ein Zehncentstück: ein Weibchen von *Sphaerodactylus ariasae*

Die ersten Sterne

Neuen Modellrechnungen zufolge waren die frühesten Himmelskörper außergewöhnlich massereich und hell, aber auch kurzlebig. Mit ihrer Entstehung nahm die Geschichte des Kosmos eine dramatische Wendung.

ALLE ABBILDUNGEN: DON DIXON

Von Richard B. Larson und Volker Bromm

Wir leben in einem Universum voll strahlender Himmelskörper. In klaren Nächten vermag das bloße Auge Tausende von Sternen wahrzunehmen. Sie alle bevölkern nur einen kleinen Ausschnitt der Milchstraße, unserer Heimatgalaxie; Teleskope enthüllen einen viel größeren Bereich, den das Licht von Milliarden Galaxien erhellt. Hingegen war das urtümliche Universum nach heutigem Kenntnisstand lange Zeit strukturlos und dunkel. Die ersten Sterne erschienen wohl erst 100 Millionen Jahre nach dem Urknall, und nahezu eine Milliarde Jahre verging, bevor Galaxien den Kosmos übersäten. Die Astronomen haben sich lange gefragt: Wie kam dieser dramatische Wandel vom Dunkel zum Licht zu Stande?

Nach jahrzehntelanger Forschung ist die Wissenschaft erst kürzlich der Antwort einen großen Schritt näher gerückt. Mit ausgeklügelten Computersimulationen haben die Kosmologen Modelle dafür entwickelt, wie aus den Dichtefluktuationen, die der Urknall hinterließ, die ersten Sterne hervorgingen. Zusätzlich haben Beobachtungen ferner Quasare – der lichtstärksten Objekte im All – ein Fenster weit zurück in die Zeit eröffnet und einen Blick auf die letzten Tage des kosmischen „dunklen Zeitalters“ ermöglicht.

Die neuen Modelle besagen, dass die ersten Sterne ungemein massereich und leuchtkräftig waren – und dass ihre Entstehung das Universum und seine weitere Evolution fundamental veränderte. Indem diese Sterne die umgebenden Gase aufheizten und ionisierten, wandelte sich die Dynamik des Kosmos. Die frühesten Sterne erzeugten außerdem die ersten schweren Elemente und ebneten so den Weg zur späteren Bildung von Planetensystemen wie dem unsrigen. Zudem könnte der Kollaps einiger urtümlicher Sterne das Wachstum massereicher Schwarzer Löcher eingeleitet haben, die in den Herzen der Galaxien entstanden und zu den geradezu unerschöpflichen Energiequellen der Quasare wurden. Kurz gesagt, die ersten Sterne haben das Universum möglich gemacht, wie wir es heute sehen – von Galaxien und Quasaren bis zu Planeten und menschlichem Leben.

Das dunkle Zeitalter

Die Erforschung des frühen Universums wird durch das Fehlen direkter Beobachtungen erschwert. Einen Großteil der Geschichte des Alls konnten die Astronomen untersuchen, indem sie ihre Teleskope auf ferne Galaxien und Quasare richteten, die ihr Licht vor Milliarden Jahren aussandten. Das Alter jedes Objekts lässt sich durch die Rotverschiebung seines Lichts bestimmen; sie zeigt, um wie viel sich das All seit der Aussendung dieser Strahlung ausgedehnt hat. Die ältesten bisher beobachteten Galaxien und Quasare sind demnach – wenn man ein heutiges Weltalter von 12 bis 14 Milliarden Jahren annimmt – auf etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall zu datieren. Nur mit noch besseren Teleskopen werden noch fernere Objekte aus noch früheren Zeiten zu erkennen sein.

Die Kosmologen können jedoch Aussagen über das frühe Universum aus der kosmischen Hintergrundstrahlung ableiten, die etwa 400000 Jahre nach dem Urknall ausgestrahlt wurde. Die Gleichförmigkeit dieser Strahlung zeigt an, dass die Materie damals sehr gleichmäßig verteilt war. Weil es keine großen leuchtkräftigen Objekte gab, welche die kosmische Ursuppe in Wallung bringen konnten, muss sie Millionen Jahre lang gleichmäßig und strukturlos geblieben sein. Mit der Expansion des Kosmos verschob sich die Hintergrundstrahlung zu größeren Wellenlängen, und das Universum wurde immer kühler und dunkler. Diese dunkle Ära ist der astronomischen Beobachtung nicht zugänglich. Aber eine Milliarde Jahre nach dem Urknall existierten bereits einige helle Galaxien und Quasare – mithin müssen die ersten Sterne schon etwas eher entstanden sein. Aber wann und wie?

Viele Astronomen haben zur Klärung dieses Rätsels wichtige Beiträge geleistet, unter anderem Martin Rees von der ▶

Die frühesten kosmischen Strukturen bestanden wahrscheinlich aus einem Netzwerk von Filamenten. Die ersten Protogalaxien – nur 30 bis 100 Lichtjahre groß – kondensierten in den Knoten dieses Netzwerks. Innerhalb der Protogalaxien kollabierten dann die dichteren Gasregionen und bildeten die ersten Sterne (vergrößerter Ausschnitt).

im Universum



Universität Cambridge und Abraham Loeb von der Harvard-Universität. Die aktuellen Untersuchungen gehen vom kosmologischen Standardmodell für die Entwicklung des Universums nach dem Urknall aus. Obwohl das junge Universum erstaunlich homogen war, sind in der Hintergrundstrahlung doch kleinräumige Dichteschwankungen zu erkennen – sozusagen Klumpen in der Ursuppe. Den kosmologischen Modellen zufolge entwickeln sich diese Klumpen allmählich zu durch Schwerkraft gebundenen Strukturen. Zuerst entstehen kleinere Systeme und verschmelzen dann zu größeren Gebilden. Die dichteren Regionen nehmen die Gestalt eines Netzwerks aus Filamenten an, und die ersten sternbildenden Systeme – kleine Protogalaxien – kondensieren in den Knoten dieses Netzwerks. Auf ähnliche Weise verschmelzen die Protogalaxien dann zu Galaxien, und diese wiederum finden sich zu Galaxienhaufen zusammen. Dieser Prozess dauert noch heute an: Obwohl die Galaxienbildung weit gehend abgeschlossen ist, sammeln sich die Galaxien zu Haufen, die ihrerseits zu einem gigantischen Filament-Netzwerk gerinnen, das sich durch das ganze Universum zieht.

Gemäß den kosmologischen Modellen sollten die ersten Systeme, in denen sich Sterne bilden konnten, 100 bis 250 Millionen Jahre nach dem Urknall aufgetaucht sein. Diese Protogalaxien hatten demnach 100000 bis eine Million Sonnenmassen und waren 30 bis 100 Lichtjahre groß. Insofern gleichen sie den Wolken aus molekularem Gas, in denen auch gegenwärtig in der Milchstraße Sterne entstehen, doch es gibt markante Unterschiede. Zum einen bestanden die Protogalaxien größtenteils aus so genannter dunkler Materie – aus hypothetischen Elementarteilchen, die vermutlich rund 90 Prozent der Masse des Universums ausmachen. In heutigen Galaxien ist die dunkle Materie von der gewöhnlichen entkoppelt: Letztere hat sich im Laufe der Zeit in den inneren Regionen konzentriert, während die dunkle Materie über einen enormen Halo verteilt bleibt. In den Protogalaxien hingegen waren gewöhnliche und dunkle Materie noch miteinander vermengt.

Das All ohne Metall

Der zweite große Unterschied ist, dass die Protogalaxien außer den beiden leichtesten Elementen Wasserstoff und Helium, die noch vom Urknall stammten, kaum andere chemische Elemente enthielten. Da die meisten schwereren Elemente nur durch thermonukleare Fusion in Sternen entstehen, konnten sie vor der Bildung der ersten Sterne noch gar nicht existieren. Die Astronomen pflegen all diese schwereren Elemente „Metalle“ zu nennen. Die jungen metallreichen Sterne in der Milchstraße werden zur Population I gezählt, die alten metallarmen Sterne zur Population II. Sterne, die überhaupt keine Metalle enthalten – die allererste Generation –, heißen manchmal Sterne der Population III.

Weil es anfangs noch gar keine Metalle gab, war die Physik der ersten sternbildenden Systeme viel einfacher als die heutiger Molekülwolken. Die kosmologischen Modelle liefern im Prinzip eine komplette Beschreibung der Anfangsbedingungen vor der ersten Sterngeneration; hingegen entstehen die Sterne, die aus Molekülwolken hervorgehen, in einer komplexen Umwelt, die von früherer Sternbildung geprägt ist. Darum ist die Entstehung der ersten Sterne ein theoretisch attraktives Problem, das sich gut für Computersimulationen eignet.

Die realistischsten Simulationen haben Tom Abel von der Pennsylvania State University, Greg Bryan vom Massachusetts Institute of Technology und Michael L. Norman von der Universität von Kalifornien in San Diego gemeinsam durchgeführt. In Zusammenarbeit mit Paolo Coppi von der Yale-Universität haben wir Simulationen berechnet, die von einfacheren Annahmen ausgehen, dafür aber flexibler anwendbar sind. In Japan hat Toru Tsuribe, jetzt an der Universität von Osaka, ähnliche Rechnungen mit leistungsfähigeren Computern durchgeführt; Fumitaka Nakamura und Masayuki Umemura (jetzt an den Universitäten Niigata beziehungsweise Tsukuba) haben idealisiertere und dennoch aussagekräftige Simulationen präsentiert. Obwohl all diese Studien sich in verschiedenen Details unterscheiden, stimmen die Resultate im Prinzip gut überein.

Wie die Modellrechnungen zeigen, bilden sich die primordialen Gaswolken meist in den Knoten eines kleinräumigen Filament-Netzwerks und beginnen sich dann durch ihre eigene Schwerkraft zusammenzuziehen. Die Kompression erhitzt das Gas auf über 1000 Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt, der bei –273,15 Grad Celsius liegt). Manche Wasserstoffatome bilden im dichten heißen Gas Paare und somit Spuren molekularen Wasserstoffs. Diese Moleküle beginnen dann die dichtesten Bereiche des Gases abzukühlen, indem sie – nach der Kollision mit Wasserstoffatomen – Infrarotstrahlung emittieren. In den dichtesten Zonen fällt die Temperatur auf 200 bis 300 Kelvin, wodurch dort der Gasdruck sinkt und sich Klumpen bilden, die durch die Gravitation zusammengehalten werden.

Diese Abkühlung spielt eine entscheidende Rolle für die Trennung von gewöhnlicher und dunkler Materie. Der Wasserstoff bildet mit sinkender Temperatur ein flaches rotierendes Gebilde von klumpiger und scheibenförmiger Gestalt. Doch da die Teilchen der dunklen Materie nicht strahlen, verlieren sie keine Energie und bleiben über die ursprüngliche Wolke verstreut. Das sternbildende System ähnelt darum einer Mini-Galaxie, deren Scheibe aus gewöhnlicher Materie besteht und von einem Halo aus dunkler Materie umgeben ist. Innerhalb der Scheibe ziehen sich die dichtesten Klumpen immer weiter zusammen, bis einige von ihnen kollabieren und zu Sternen werden.

Die ersten sternbildenden Klumpen waren viel wärmer als die Molekülwolken, in denen sich gegenwärtig die meisten Sterne bilden. Staubkörnchen und Moleküle mit schweren Elementen kühlen die heutigen Wolken viel effizienter – bis auf Temperaturen von nur 10 Kelvin. Die Masse, die ein Gasklumpen wenigstens haben muss, um unter seiner eigenen Schwerkraft zu kollabieren, heißt Jeans-Masse nach dem englischen Astrophysiker Sir James Jeans (1877–1946); sie ist proportional zum Quadrat der Temperatur und umgekehrt proportional zur Quadratwurzel des Drucks. In den

STECKBRIEF

➤ **Die ersten Sterne** entstanden vermutlich 100 bis 250 Millionen Jahre nach dem Urknall, und zwar in kleinen Protogalaxien, die ihrerseits aus Dichtefluktuationen im frühen Universum hervorgingen.

➤ Weil die **Protogalaxien** außer Wasserstoff und Helium praktisch keine chemischen Elemente enthielten, führte die Physik der Sternentstehung vorzugsweise zur Bildung von Himmelskörpern, die viel massereicher und leuchtkräftiger waren als die Sonne.

➤ Einige dieser frühesten Sterne explodierten als **Supernovae** und verstreuten schwere Elemente im Universum. Die massereichsten Sterne kollabierten zu **Schwarzen Löchern**. Als die Protogalaxien zu den heutigen Galaxien verschmolzen, konzentrierten sich die Schwarzen Löcher vermutlich in den galaktischen Zentren.

Der Kosmos im Zeitraffer

Vom dunklen Zeitalter ...

Nach der Emission der kosmischen Hintergrundstrahlung – rund 400 000 Jahre nach dem Urknall – wurde das All immer kälter und dunkler. Doch aus den Dichteschwankungen, die vom Urknall übrig geblieben waren, entwickelten sich allmählich kosmische Strukturen.

... zur kosmischen Renaissance

Das Erscheinen der ersten Sterne und Protogalaxien – vielleicht schon 100 Millionen Jahre nach den Urknall – setzte eine Kette von Ereignissen in Gang, die das Universum völlig veränderten.

ersten sternbildenden Systemen herrschten ähnliche Drücke wie in heutigen Molekülwolken, aber fast 30-mal höhere Temperaturen. Darum war ihre Jeans-Masse fast 1000-mal größer.

In den Molekülwolken in unserem Bereich der Milchstraße entspricht die Jeans-Masse ungefähr derjenigen der Sonne, und ähnliche Massen haben auch die prästellaren Klumpen, die man in diesen Wolken findet. Extrapoliert man um einen Faktor von fast 1000, dann müssten die ersten sternbildenden Klumpen 500 bis 1000 Sonnenmassen gehabt haben – und tatsächlich entstehen in all den oben erwähnten Computersimulationen stets Klumpen mit mehreren hundert oder noch mehr Sonnenmassen.

Nach den Berechnungen unserer Gruppe sind die Massen der ersten sternbildenden Klumpen relativ unabhängig von den angenommenen kosmologischen Bedingungen, etwa von der Art der ursprünglichen Dichtefluktuationen. Viel wichtiger als das kosmologische Modell oder die Simulationstechnik ist die Physik des Wasserstoffmoleküls. So liefert die Tatsache, dass molekularer Wasserstoff das Gas nicht unter 200 Kelvin zu kühlen vermag, eine Untergrenze für die Temperatur der ersten sternbildenden Klumpen. Außerdem versagt die Kühlung durch molekularen Wasserstoff bei den höheren Dichten, die beim Kollaps der Klumpen auftreten. Die Wasserstoffmoleküle kollidieren dann mit anderen Atomen, bevor sie Zeit haben, ein Infrarot-Photon auszustrahlen; dies erhöht die Gastemperatur und verlangsamt die Kontraktion so lange, bis die Klumpen auf wenigstens einige hundert Sonnenmassen angeschwollen sind.

Von Klumpen zu frühen Sternen

Was wurde aus den ersten kollabierenden Klumpen? Bildeten sie Sterne mit ähnlich großen Massen oder zerfielen sie in viele kleinere Fragmente, aus denen dann entsprechend kleinere Sterne entstanden? Die Forschergruppen haben ihre Berechnungen bis zu dem Punkt getrieben, an dem die Klumpen drauf und dran sind, Sterne zu bilden – und keine Simulation lässt eine Tendenz zum Zerfall der Klumpen erkennen. Das passt zu unserem aus Beobachtungen und Simulationen gewonnenen Wissen über heutige Sterngeburten: Die Fragmentierung sternbildender Klumpen beschränkt sich meist auf die Bildung von Doppelsternsystemen. Die primordialen Klumpen dürften noch viel seltener zerfallen sein, denn die wenig wirksame Kühlung durch den molekularen Wasserstoff hielt die Jeans-Masse hoch. Die Simulationen konnten allerdings das Endergebnis des Kollapses noch nicht mit Sicherheit bestimmen, und die Entstehung von Doppelsternen lässt sich nicht ausschließen.

Die Forscherteams kommen zu etwas unterschiedlichen Abschätzungen für die Massen der ersten Sterne. Abel, Bryan und Norman meinen, diese Sterne hätten nicht mehr als 300 – nach ihrer neuesten Simulation sogar nur 100 – Sonnenmassen gehabt. Unsere eigenen Arbeiten legen bis zu 1000 Sonnenmassen nahe. Möglicherweise treffen beide Voraussagen für unterschiedliche Bedingungen zu: Die allerersten Sterne hatten vielleicht nicht mehr als 300 Sonnenmassen, während die höhere Abschätzung für Sterne zutreffen könnte, die ein wenig später aus dem Kollaps größerer Protogalaxien hervorgingen. Quantitative Voraussagen werden durch Rückkopplungseffekte erschwert; wenn sich ein massereicher Stern bildet, erzeugt er starke Strahlung und Materieströme, die einen Teil des Gases aus dem kollabierenden Klumpen treiben können. Doch da solche Effekte stark von der Anwe-

senheit schwerer Elemente im Gas abhängen, dürften sie für die ersten Sterne keine große Rolle gespielt haben. Darum spricht alles dafür, dass die ersten Himmelskörper im Universum viel massereicher und leuchtkräftiger waren als die Sonne.

Wie wirkten sich diese auf den Rest des Universums aus? Eine wichtige Eigenschaft von Sternen ohne Metalle ist ihre höhere Oberflächentemperatur: Ohne Metalle ist die Erzeugung von Fusionsenergie im Sterninneren weniger effizient, und der Stern muss heißer und kompakter sein, damit seine Energie ausreicht, der Schwerkraft zu widerstehen. Wegen der kompakteren Struktur sind auch die Oberflächenschichten heißer. Zusammen mit Rolf-Peter Kudritzki von der Universität von Hawaii und Abraham Loeb von Harvard hat einer von uns (Bromm) theoretische Modelle solcher Sterne mit 100 bis 1000 Sonnenmassen entwickelt. Demnach herrschen Oberflächentemperaturen von etwa 100000 Kelvin – rund 17-mal höher als auf der Sonne. Das erste Sternenlicht im Universum dürfte also überwiegend die Ultraviolettstrahlung sehr heißer Himmelsobjekte gewesen sein. Bald nach ihrer Entstehung müssen sie begonnen haben, das neutrale Wasserstoff- und Heliumgas in ihrer Umgebung aufzuheizen und zu ionisieren.

Dieses Ereignis nennen wir die kosmische Renaissance. Zwar können wir noch nicht abschätzen, wie viel Gas in Form der ersten Sterne kondensiert wurde, doch schon ein Hunderttausendstel der Gasmenge im Universum hätte ausgereicht, um mit den daraus entstandenen Sternen praktisch den gesamten Rest zu ionisieren. Sobald ein Stern zu leuchten begann, wuchs um ihn eine Blase aus ionisiertem Gas. Als im Lauf von hunderten Millionen Jahren immer mehr Sterne entstanden, verschmolzen die Blasen schließlich, und das intergalaktische Gas wurde komplett ionisiert.

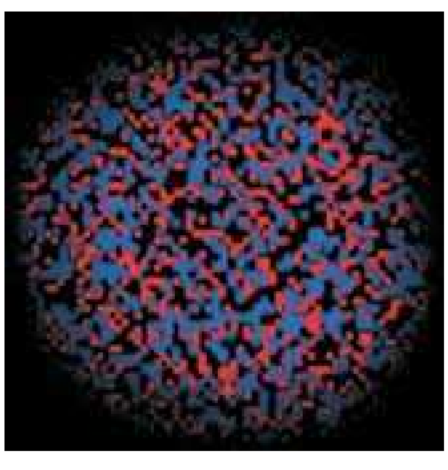
Spuren der Renaissance

Wissenschaftler vom California Institute of Technology und vom Sloan Digital Sky Survey haben kürzlich Indizien für die letzte Phase dieses Ionisationsprozesses gefunden: Sie beobachteten starke Ultraviolett-Absorption in den Spektren von Quasaren, die ihr Licht nur 900 Millionen Jahre nach dem Urknall abstrahlten. Demzufolge wurden zu jener Zeit die letzten Zonen neutralen Wasserstoffs ionisiert. Helium braucht zwar zur Ionisation mehr Energie als Wasserstoff, aber wenn die ersten Sterne so massereich waren wie von uns berechnet, haben sie das Helium zur selben Zeit ionisiert. Falls sie hingegen weniger Masse hatten, dann wurde das Helium später durch energiereiche Strahlung ionisiert, etwa von Quasaren. Künftige Beobachtungen ferner Objekte könnten klären, wann das kosmische Helium tatsächlich ionisiert wurde.

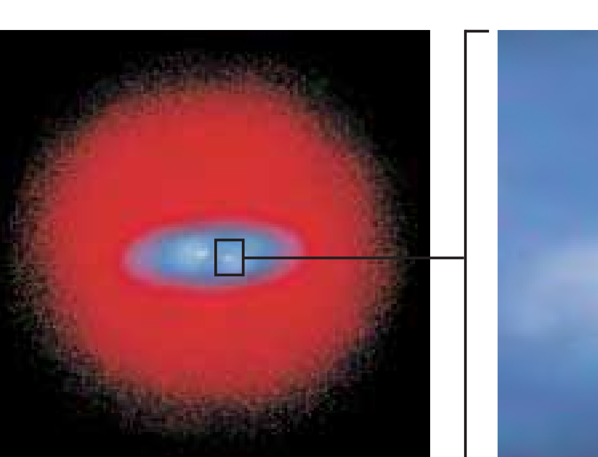
Entstehen und Vergehen der ersten Sterne

Urtümliches Wirrwarr

Der Prozess, der zur Bildung der ersten Sterne führte, unterschied sich grundlegend von der gegenwärtigen Sternentstehung. Erst das spektakuläre Ende einiger dieser Sterne ebnete den Weg zur Ausbildung der Universums, wie wir es heute kennen.



1 **Die ersten sternbildenden Systeme – kleine Protogalaxien – bestanden größtenteils aus den hypothetischen Elementarteilchen der dunklen Materie (rot). Die gewöhnliche Materie – hauptsächlich Wasserstoffatome (blau) – war anfangs mit der dunklen Materie vermischt.**



2 **Durch Abkühlung des Wasserstoffgases zog sich die gewöhnliche Materie zusammen, während die dunkle Materie gleichmäßig verteilt blieb. Der Wasserstoff bildete eine rotierende Scheibe im Zentrum der Protogalaxie.**



3 **Die dichteren Gasregionen kontrahierten zu sternbildenden Klumpen, jeder mit dem Hundertfachen der Sonnenmasse. Einige Gasklumpen kollabierten zu sehr massereichen und hellen Sternen.**



4 **Die Ultraviolettstrahlung dieser Sterne ionisierte den umgebenden Wasserstoff. Als sich immer mehr Sterne bildeten, verschmolzen die Blasen aus ionisiertem Gas, und das intergalaktische Medium wurde vollständig ionisiert.**

Literaturhinweise

Vor dem Anfang. Eine Geschichte des Universums. Von Martin J. Rees. Fischer, Frankfurt am Main 1999.

In the Beginning: The First Sources of Light and the Reionization of the Universe. Von R. Barkana und A. Loeb in: Physics Reports, Bd. 349, S. 125 (2001).

The Formation of the First Stars. Von Richard B. Larson in: Star Formation from the Small to the Large Scale. Von F. Favata, A. A. Kaas und A. Wilson (Hg.). ESA Publications, 2000.

Weblinks: ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Wenn die ersten Sterne wirklich sehr große Massen hatten, war ihre Lebensdauer eher gering – nur ein paar Millionen Jahre. Einige wären am Ende als Supernovae explodiert und hätten die durch Fusionsreaktionen in ihrem Inneren erzeugten Metalle abgestoßen. Sterne mit 100 bis 250 Sonnenmassen sollten durch energiereiche Explosionen komplett zerstört werden, und einige der ersten Sterne hatten wahrscheinlich Massen in diesem Bereich. Weil Metalle die sternbildenden Wolken viel wirksamer kühlen und zu Sternen kollabieren lassen als Wasserstoff, hätte schon das Erzeugen und Verteilen relativ kleiner Metallmengen enorme Auswirkungen auf die nachfolgende Sternbildung gehabt.

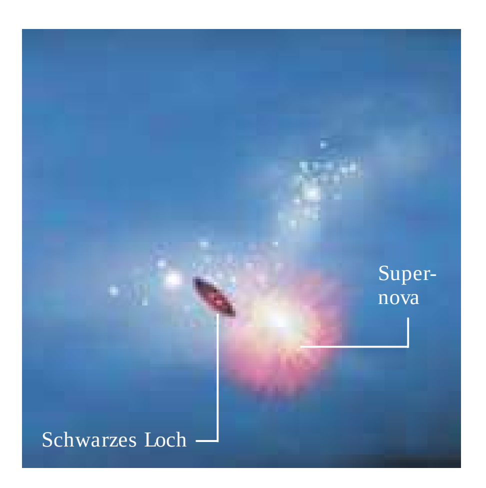
In Zusammenarbeit mit Andrea Ferrara von der Universität Florenz haben wir herausgefunden, dass schon eine Metallhäufigkeit von nur einem Tausendstel des solaren Werts ausgereicht hätte, das Gas der sternbildenden Wolken rasch auf die damalige Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung zu kühlen; diese Temperatur ist mit der kosmischen Expansion ständig gesunken – von 19 Kelvin eine Milliarde Jahre nach dem Urknall auf gegenwärtig 2,7 Kelvin. Die effiziente Kühlung ermöglichte die Bildung von Sternen kleinerer Masse und erhöhte vermutlich die gesamte Sternbildungsrate beträchtlich. Vielleicht hat sich das Tempo der Sternentstehung überhaupt erst beschleunigt, nachdem die ersten Metalle erzeugt worden waren. In diesem Fall war eher die zweite Sterngeneration dafür verantwortlich, das Weltall zu erhellen und die kosmische Renaissance einzuleiten.

Zu Beginn dieser aktiven Periode der Sternentstehung war die Temperatur des kosmischen Hintergrunds höher als die in heutigen Molekülwolken, wo sie bei 10 Kelvin liegt. Bis die Temperatur auf letzteren Wert fiel – das geschah etwa zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall –, dürfte der Prozess der Sternentstehung noch immer massereiche Sterne favorisiert haben. Eine große Zahl solcher Sterne entstand während der ersten Stadien der Galaxienbildung durch sukzessives Verschmelzen von Protogalaxien; ein ähnlicher Vorgang ereignet sich im heutigen Universum bei einem so genannten Starburst – einem plötzlichen Anstieg der Sternbildungsrate, der durch die Kollision von zwei Galaxien ausgelöst wird. Zwar sind solche Ereignisse heutzutage eine Seltenheit, doch dabei scheint eine relativ große Zahl massereicher Sterne zu entstehen (siehe „Sternentstehung in Spiralgalaxien“ von Jordi Cepa Nogué, SdW 9/2000, S. 46, und „Starbursts in Zwerggalaxien“ von Sara C. Beck, SdW 10/2000, S. 30).

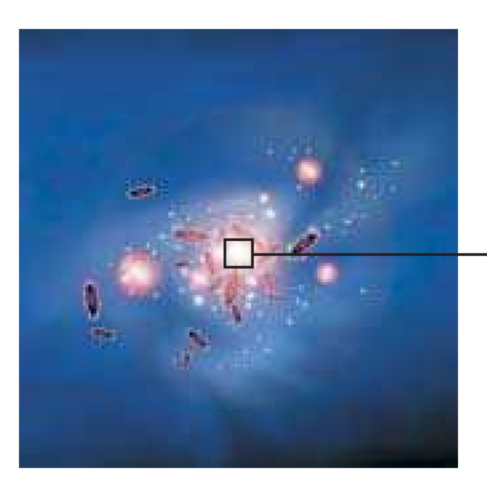
Rätsel der Vergangenheit

Diese Hypothese über die frühe Sternbildung könnte nebenbei einige seltsame Eigenschaften des heutigen Universums erklären. Ein ungelöstes Problem ist zum Beispiel, dass die Galaxien weniger metallarme Sterne enthalten, als man erwarten würde, wenn die Metalle proportional zur Sternbildungsrate produziert worden wären. Diese Diskrepanz lässt sich erklären, wenn bei der frühen Sternbildung relativ mehr massereiche Sterne entstanden sind: Bei ihrem explosiven Ende haben sie große Metallmengen im Raum verstreut, die dann in die meisten massearmen Sterne eingebaut wurden, die wir heute sehen.

Ein anderes Rätsel ist der hohe Metallgehalt des heißen intergalaktischen Gases in Galaxienhaufen, das sich durch seine energiereiche Röntgenstrahlung bemerkbar macht. Sein Metallreichtum ließe sich am einfachsten durch eine frühe Periode rapider Sternbildung erklären, mit entsprechend vielen Supernovae, die das Gas zwischen den Galaxien chemisch anreicherten. Eine hohe Supernova-Rate in früher Zeit passt auch zu neuen Indizien dafür, dass die normale ▶



5 **Schon wenige Millionen Jahre später explodierten einige der ersten Sterne als Supernovae. Die massereichsten Sterne kollabierten zu Schwarzen Löchern.**



6 **Die Protogalaxien zogen einander durch ihre Schwerkraft an. Die Kollisionen lösten höchstwahrscheinlich heftige Sternbildungsschübe aus – ähnlich den durch galaktische Verschmelzungen ausgelösten Starbursts im heutigen Kosmos.**



7 **Mehrere Schwarze Löcher verschmolzen vermutlich zu einem extrem massereichen Schwarzen Loch im Zentrum der Protogalaxie. In dieses Loch stürzendes Gas könnte eine Art Quasar-Strahlung erzeugt haben.**

INTERVIEW

Im Anfang war nur der Wasserstoff …

Werner M. Tscharnuter und Christian Straka vom Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg untersuchen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Galaxien im jungen Universum“, wie die ersten Sterne entstanden.

Spektrum der Wissenschaft: *Herr Professor Tscharnuter, wie muss man sich das Universum vorstellen, als es noch keine Sterne und Galaxien gab?*

Professor Tscharnuter: Die früheste Information, die wir vom jungen Universum haben, ist die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie stammt aus einer Zeit, zu der sich das Weltall so weit ausgedehnt und abgekühlt hatte, dass sich die im Urknall gebildeten Grundbausteine der Materie zu neutralen Atomen, zu Wasserstoff und Helium, zusammenlagern konnten. Das Wasserstoff- und Heliumgas war erstaunlich homogen im Weltall verteilt. Damals war es finster, denn es gab keine leuchtenden Himmelsobjekte.

Spektrum: *Wie konnten aus dieser homogenen Ursuppe die heutigen Strukturen und Himmelskörper entstehen?*

Tscharnuter: In der Hintergrundstrahlung gibt es geringe Abweichungen von der Homogenität – in der Größenordnung von einem Hunderttausendstel. Dieselben Fluktuationen muss es in der Materieverteilung gegeben haben. Diese winzigen Dichteunterschiede haben sich im Laufe der Zeit vergrößert. So entstanden filamentartige Strukturen im Universum. An diesen Knoten haben sich lokal die ersten Sterne beziehungsweise Galaxien gebildet.

Spektrum: *Konnten sich diese Verdichtungen denn rasch genug bilden?*

Tscharnuter: Die Schwerkraft sorgt dafür, dass zufällig vorhandene Verdichtungen weitere Materie aus der Umgebung anziehen. Um aber die beobachtete Strukturbildung im All erklären zu können, muss man annehmen, dass es zusätzlich zur gewöhnlichen Materie noch so genannte kalte, dunkle Materie gibt, die sich nur durch ihre Gravitationswirkung bemerkbar macht.

Spektrum: *Wodurch unterscheiden sich beide Materiearten?*

Straka: Ein wesentlicher Unterschied ist, dass der Wasserstoff irgendwann Moleküle bildet, dann Energie in Form von Strahlung abgibt und sich dadurch abkühlt. Darum sinkt die Temperatur des Gases, und es kann sich weiter verdichten. Dunkle Materie hingegen kann keine Energie abstrahlen.

Spektrum: *Entscheidend für den Beginn der Sternentstehung ist also die Bildung von Wasserstoffmolekülen?*

Tscharnuter: In der Tat. Atomarer Wasserstoff, wie er anfangs vorlag, hat kein Dipolmoment und kann daher keine Energie abstrahlen. Ein Wasserstoffmolekül hingegen strahlt durch Vibrations- und Rotationsübergänge langsam Energie ab. Damit sich zwei Wasserstoffatome im All zu einem Molekül verbinden können, braucht es allerdings einen dritten Stoßpartner, der die überschüssige Bewegungsenergie aufnimmt. Erst als sich das Gas so weit verdichtet hatte, dass Dreierstöße häufig genug waren, stieg die Molekülbildung rapide an. Damit wurde die Kühlung effizienter, und die Gaswolken konnten weiter kollabieren – die ersten Protosterne entstanden.




Erforschen frühe Sterne: Werner Tscharnuter (links) und Christian Straka

Spektrum: *Wie unterscheiden sich diese Sterne von denen, die wir heute im Weltall sehen?*

Tscharnuter: Die ersten Sterne bestanden nur aus Wasserstoff und Helium. Schwerere Elemente, die „Metalle“, gab es noch nicht. Dieser Unterschied in der Chemie führt direkt zu einer anderen Energieerzeugung und damit zu viel höheren Temperaturen und größeren Massen als bei heutigen Sternen.

Spektrum: *Worin liegt der Unterschied in der Energieerzeugung genau?*

Tscharnuter: In heutigen Sternen verschmilzt Wasserstoff über komplizierte Reaktionen zu Helium. Dabei wirken Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff als Katalysator. Für einen Stern ohne Metalle gibt es nur einen Weg, um Energie aus Kernfusion freizusetzen: Die Gasmassen müssen durch Kontraktion so dicht und so heiß werden, dass jeweils drei Helium-Kerne zu einem Kohlenstoff-Kern verschmelzen können. In einem weiteren Schritt entsteht dann Stickstoff. Die Kohlenstoff-Produktion läuft erst bei Temperaturen um 100 Millionen Grad in nennenswerten Mengen ab. Dazu sind Massen erforderlich, die einige Dutzend Mal größer sind als die Masse unserer Sonne.

Spektrum: *Ein Stern ohne Metalle sollte einfacher zu beschreiben sein als ein normaler Stern.*

Tscharnuter: Dennoch gibt es Überraschungen. Christian Straka hat herausgefunden, dass die herkömmliche Theorie vom Aufbau der Sterne hier in gewissen Bereichen unzureichend ist.

Spektrum: *Können Sie das erläutern?*

Straka: Das hängt damit zusammen, dass die Produktion des Kohlenstoffs und seine Vermischung im konvektiven Kern des Sterns auf ähnlichen Zeitskalen ablaufen. Um das durchzurechnen, muss man Produktion, Mischung, Energieerzeugung und Sternaufbau koppeln und viele Gleichungen simultan lösen.

Spektrum: *Welche Zeitskala ist das?*

Straka: Die Zeitskala für die Konvektion im Kern liegt bei rund zehn Tagen – sowohl für heutige Sterne als auch für die ohne Metalle. Aber wegen der hohen Temperatur der ersten Sterne ist die Zeitskala für die Kernreaktionen viel kürzer als bei heutigen Sternen. Das betrifft vor allem den Zyklus, in dem Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff als Katalysator für die Energieerzeugung wirken. Für Sterne ohne Metalle liegt diese Zeitskala nur im Bereich von Tagen wie eben auch das konvektive Mischen.

Spektrum: *Gibt es eine Chance, die ersten heißen Sterne zu sehen?*

Tscharnuter: Nein. Die haben innerhalb einer Million Jahre ihren Brennstoff verbraucht und sind als Supernova explodiert. Ihr einziger Lebenszweck war es offenbar, das Universum mit schweren Elementen anzureichern.

Interview: **Dr. Uwe Reichert,**
Spektrum der Wissenschaft

Sternen-Steckbriefe

Die frühesten Himmelskörper: anders als die Sonne

Aufwendige Computersimulationen haben den Wissenschaftlern einige Hinweise auf die Massen, Größen und andere Charakteristika der ersten Sterne geliefert. Die Angaben unten vergleichen die besten Modellabschätzungen mit den Daten unserer Sonne.



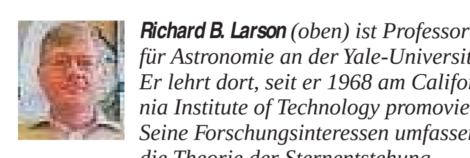
Materie sowie die Metalle des Universums größtenteils nicht in den Galaxien stecken, sondern im diffusen intergalaktischen Medium: Die Galaxienbildung muss ein dramatischer Vorgang gewesen sein, mit intensiver Produktion massereicher Sterne und einem regelrechten Feuerwerk von Supernovae, die den Großteil des Gases und der Metalle aus den Galaxien hinaustrieben.

Sterne mit mehr als 250 Sonnenmassen kollabieren schließlich und endlich zu ähnlich massereichen Schwarzen Löchern. Mehrere Computersimulationen besagen, dass einige der ersten Sterne tatsächlich derart große Massen hatten. Da die frühen Sterne in den dichtesten Regionen des Universums entstanden, wurden die aus ihrem Kollaps hervorgehenden Schwarzen Löcher durch sukzessive Verschmelzungen in immer größere Systeme integriert. Möglicherweise konzentrierten sich einige dieser Schwarzen Löcher im inneren Bereich großer Galaxien und lösten dort die Entstehung der extrem massereicher Schwarzen Löcher aus – mit Millionen Sonnenmassen –, die man jetzt in galaktischen Kernen vermutet.

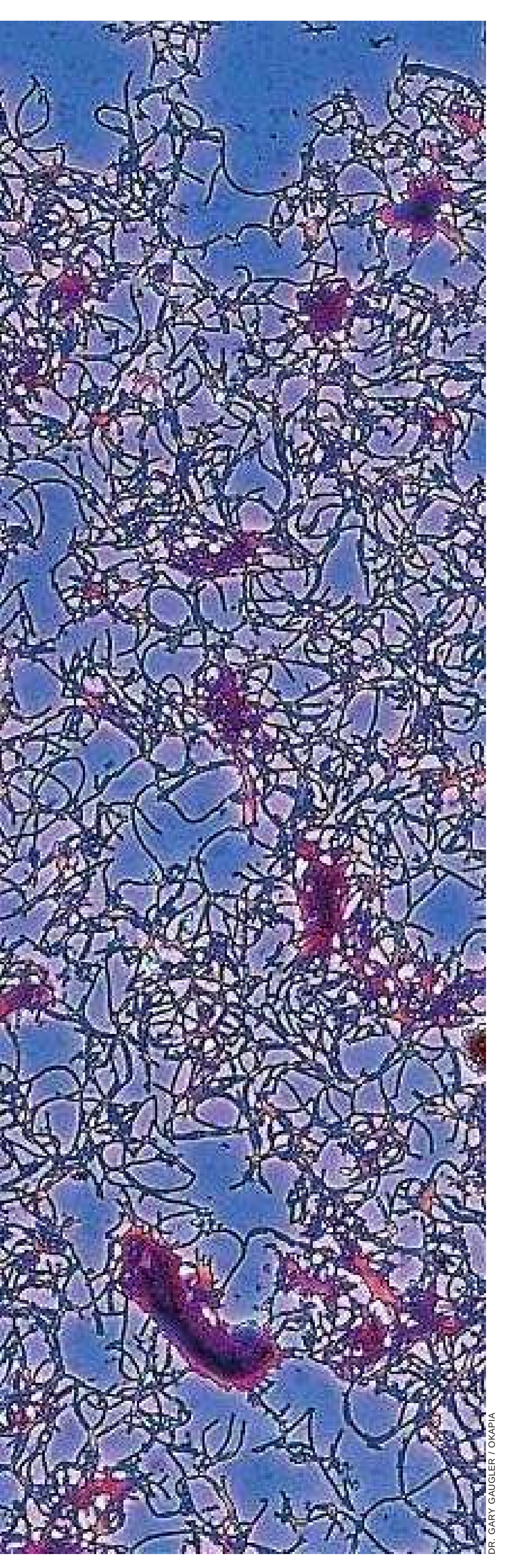
Auch glauben die Astronomen, dass die Energiequellen der Quasare gigantische Gaswirbel sind, die in die Schwarzen Löcher im Zentrum großer Galaxien stürzen. Wenn es einst im Zentrum einiger Protogalaxien kleinere Schwarze Löcher gab, dann könnte die Akkretion von Materie um diese Löcher „Mini-Quasare" produziert haben. Da diese Objekte schon kurz nach den ersten Sternen auftauchten, bildeten sie vielleicht in früher Zeit eine zusätzliche Quelle von Licht und ionisierender Strahlung.

Auf diese Weise entsteht ein insgesamt schlüssiges – wenn auch in Teilen noch spekulatives – Bild von der Frühgeschichte des Universums. Die Bildung der ersten Sterne und Protogalaxien setzte eine lebhafte kosmische Evolution in Gang. Vieles spricht dafür, dass es einige Jahrmilliarden nach dem Urknall eine Phase intensivster Sternentstehung, Galaxienbildung und Quasar-Aktivität gab; all diese Prozesse sind seither weitergegangen, freilich mit abnehmender Intensität, je älter das Universum wurde. Das Herausbilden kosmischer Strukturen hat sich seither zu größeren Maßstäben verschoben, indem die Galaxien sich zu Haufen und Superhaufen gruppieren.

In den kommenden Jahren werden die Forscher vermutlich mehr über die kosmische Frühgeschichte erfahren, in der die Strukturbildung in kleinstem Maßstab begann. Da die ersten Sterne offenbar sehr massereich und hell waren, könnte das Next Generation Space Telescope – der geplante Nachfolger des Hubble Space Telescope – einige dieser uralten Himmelskörper aufspüren. Dann würden die Astronomen direkt beobachten, wie ein dunkler, strukturloser Kosmos sich zu dem strahlenden Sternenhimmel entfaltet hat, der uns Licht und Leben schenkt. ■




__Richard B. Larson__ (oben) ist Professor für Astronomie an der Yale-Universität. Er lehrt dort, seit er 1968 am California Institute of Technology promovierte. Seine Forschungsinteressen umfassen die Theorie der Sternentstehung und die Evolution der Galaxien. Nach seinem Studium in Heidelberg promovierte __Volker Bromm__ 2000 in Yale und erforscht derzeit am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics die Entstehung kosmischer Strukturen.


DR. GARY GAUGLER / OKAPIA

MILZBRAND

Früher Geißel, heute Biowaffe

Seit einem halben Jahrhundert kennen die Industrieländer den einst häufigen Milzbrand praktisch nicht mehr. Nun verbreitet sein Erreger erneut Schrecken. Denn *Bacillus anthracis* eignet sich hervorragend als biologisches Geschütz: Mit relativ wenig Aufwand erzeugen seine Keime verheerende Wirkung.

Von Willy Hansen und Jean Freney

Der griechische Held Herakles erlitt Höllenqualen, als er ein Hemd anlegte, das seine Gattin Dejanira im Glauben an einen Liebeszauber mit dem Blut des Zentauren Nessos bestrichen hatte. So rächte sich der Zentaure dafür, dass Herakles ihn tödlich verwundet hatte, weil er Dejanira Gewalt antun wollte. Das Nessoshemd zerfraß das Fleisch des Helden, der sich darum verbrennen ließ.

Erzählt diese Sage vom Milzbrand? Die Krankheit wurde noch im 19. Jahrhundert oft durch wollene Kleidungsstücke übertragen, wie auch durch Decken und Tierhäute. In der Antike beschrieb sie schon der griechische Arzt Hippokrates, der um 460 bis um 370 vor unserer Zeitrechnung lebte. Die Seuche war auch im alten Ägypten bekannt und war wahrscheinlich eine der sieben Plagen, von denen die Bibel erzählt. Dass der Milzbrand im alten Rom häufig auftrat, berichten die Dichter Lukrez (um 97–55 v. Chr.) und Vergil (70–19 v. Chr.). Vergil wusste bereits, dass der Mensch ihn sich bei Schafen holt.

Charakteristisch für die Erkrankung sind schwarzes Blut und eine wie verbrannt wirkende Milz. Franzosen sprechen vom kohligen Fieber oder sagen einfach Kohle – „charbon“ –, Engländer haben die Bezeichnung „anthrax“, das griechische Wort für Kohle, im Deutschen noch als Anthrazit in Erinnerung. Es gab dafür viele Namen, darunter persisches Feuer oder auch sibirische Pest und kohlige Pest, obwohl der Milzbrand zwar Beulen erzeugt, mit der eigentlichen Pest aber nichts zu tun hat.

Hauptsächlich tritt Milzbrand bei Weidevieh auf, also bei Kühen, Schafen, Ziegen, Pferden, seltener auch bei Schweinen. Die Sporen des Erregers, *Bacillus anthracis*, überleben im Boden sehr lange und werden mit dem Futter aufgenommen.

Der Mensch steckt sich vor allem an, wenn er mit infizierter Wolle, mit Häuten oder Leder hantiert. Dringen die Sporen durch kleine Hautwunden ein, entsteht der oft weniger gefährliche Hautmilzbrand, bei dem zunächst Ödeme auftreten. Eingeatmete Sporen aber lösen Lungen-Milzbrand aus. Der verläuft meist tödlich, wenn nicht sehr früh Antibiotika verabreicht werden. Es gibt außerdem den Darm-Milzbrand, der durch Verzehr verseuchten Fleisches hervorgerufen wird und ebenfalls akut lebensgefährlich ist. Zu den Erscheinungsformen gehört auch eine Hirnhautentzündung.

In den Industrieländern ist Milzbrand heute selten geworden. Viele jüngere Ärzte wurden damit in der Praxis noch nie konfrontiert. Dafür ist die Krankheit in den ehemaligen Ostblockländern nach wie vor heimisch, ebenso wie in Ländern um das Mittelmeer. Besonders in der Türkei, aber auch in Afrika, in Südostasien und in Südamerika kommt er noch häufig vor. Sogar Epidemien treten noch auf, etwa in Mittelamerika in Guatemala und in Afrika in Guinea, Mauretanien und im Niger. In Südostasien ist vor allem Vietnam durch diese Geißel geschlagen.

Der Erreger des Milzbrandes ist ein sehr großer stäbchenförmiger Bazillus,

der sich durch eine Kapsel vor dem Immunsystem schützt (siehe den Artikel Seite 40). In Blut und Eiter bildet er kleine Ketten. Im Kulturmedium entsteht ein dichtes Gewirr langer Fäden, die an Bambusstäbe erinnern. Bei Nährstoffmangel bildet das Bakterium dagegen eiförmige Sporen, die mindestens Jahrzehnte überleben.

Tiere infizieren sich gewöhnlich durch Gras oder anderes verunreinigtes Futter. Meistens gelangen die Sporen über eine kleine Wunde im Maul in den Körper. Es entsteht eine Blutvergiftung, an der das Tier ein bis zwei Tage später verendet. Seine Milz ist sehr stark vergrößert und schwarz, das Blut schwarz und klebrig. Es gerinnt nicht und enthält große Mengen der Bazillen, die neue Sporen ausbilden können.

Steckt sich der Mensch durch eine Hautwunde an, zeigt sich an der Stelle nach zwei bis drei Tagen ein Knötchen wie bei einem Insektenstich. Daraus wird ein juckendes Bläschen, und später bildet sich schwarzer Schorf, umgeben von einem rötlichen verhärteten Wulst sowie kleinen Bläschen mit einer gelblichen Flüssigkeit. Nur wenn der Schorf sich ausdehnt und die Infektion in tiefere Hautschichten vordringt, entwickeln sich große gefährliche Ödeme und die Krankheit kann sich im Körper ausbreiten. Bei zeitiger Behandlung mit Antibiotika ist diese Form der Infektion meist schnell beherrschbar.

Tot innerhalb von Stunden

Lungen-Milzbrand, verursacht durch Einatmen von Milzbrand-Staub, den Sporen des Erregers, äußert sich durch Atemnot, Husten, Bronchitis mit zähem bräunlichem Auswurf und Lungenstauung. Kommt eine Milzbrand-Meningitis hinzu, verläuft die Krankheit normalerweise tödlich. Lungen-Milzbrand ist selten geworden, seit in den gefährdeten Berufen Vorbeugungsmaßnahmen ergriffen werden.

Auch Darm-Milzbrand tritt in Industrienationen kaum noch auf, kommt aber in Epidemie-Gebieten Asiens und Afrikas nach dem Verzehr verseuchten Fleisches recht häufig vor. Diese Form äußert sich mit Fieber, Appetitlosigkeit, Übelkeit, Erbrechen, Bauchschmerzen und blutigem Durchfall. Die Erkrankten können innerhalb weniger Stunden sterben.

Auch hier zu Lande war Milzbrand früher eine Plage, die ganze Viehbestände dahinraffte. Durch die Jahrhunderte scheint er in Zentraleuropa, Frankreich und Russland schwere Schäden angerichtet zu haben. Besonders im 14. Jahrhundert wütete die Krankheit in Europa. Am meisten litt damals Großbritannien unter der „schwarzen Geißel", die auch im 17. und 18. Jahrhundert große Verheerungen anrichtete.

Ungezählte Ärzte, Tierärzte und andere haben verzweifelt versucht, die Ursache des „kohligen" Fiebers zu ergründen. Jeder von ihnen hat dazu beigetragen, der Lösung näher zu kommen, bis der Bazillus schließlich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erkannt wurde. In den vierziger und fünfziger Jahren beobachteten Forscher im Blut kranker und verendeter Tiere unbewegliche stäbchenförmige Körper oder fadenförmige Gebilde, erkannten aber meist noch nicht ihre Bedeutung – oder sie ließen einen Verdacht nicht gelten. Waren diese kleinen Objekte das verursachende Agens oder irgendwelche anderen Strukturen, die bei der einsetzenden Verwesung entstanden? Waren es womöglich „tote Vibrionen" oder tatsächlich infektiöse Gebilde?

Die Forscher verstanden zwar nach und nach, dass es sich im Falle von Schafen, Rindern und Pferden um Erscheinungsformen der gleichen Krankheit handelt und dass diese Krankheit übertragen wird. Doch erst nachdem der französische Mikrobiologe Louis Pasteur (1822–1895) Mitte der sechziger Jahre erkannt hatte, dass Mikroorganismen Krankheiten verursachen können, zündete bei einigen Wissenschaftlern der Gedanke, dass der Milzbrand tatsächlich von den „Bakteridien" verursacht ist. Nun wurde auch nachgewiesen, dass Tiere am schwarzen Fieber erkranken, wenn man ihnen Blut von Milzbrand-Tieren überträgt.

Der normale Infektionsweg blieb dennoch zunächst unklar. Erst 1870 stellte ein französischer Tiermediziner fest, dass krankes Vieh und deren Kadaver die Weiden und Böden verseuchen. Den wichtigsten Beitrag zur Klärung der Übertragung leistete Robert Koch (1843–1910), während er als Kreisphysikus – Landarzt – in der Nähe von Posen arbeitete. Im französisch-preußischen Krieg war er als Arzt in Frankreich gewesen. In einem abgetrennten Teil seiner Praxis, den er sich als Labor einrichtete, begann er 1873 mit seinen Studien zum Milzbrand.

Damals wütete in seinem Landkreis gerade eine Milzbrand-Epidemie. Koch bestätigte nicht nur frühere Ergebnis- ▶



Die Bakterien des Milzbrand-Erregers bilden charakteristische Ketten. Schon im 19. Jahrhundert beobachteten Forscher sie im Blut kranker Tiere.


INSTITUT PASTEUR

Im Mai 1881 impfte Louis Pasteur in einem Aufsehen erregenden öffentlichen Experiment 25 Schafe gegen Milzbrand. Einige Wochen später verabreichte der französische Forscher diesen Tieren einen hochvirulenten Erreger-Stamm – doch die Tiere blieben gesund. Nicht geimpfte Schafe, die als Kontrolle herhalten mussten, verendeten jedoch innerhalb weniger Tage an Milzbrand.

se, dass die Krankheit durch Blut betroffener Tiere übertragbar ist, sondern es gelang ihm ebenfalls, die verdächtigen Stäbchen über etliche Generationen zu züchten und auch hiermit Tiere zu infizieren. Damit wies der Bakteriologe erstmals schlüssig nach, dass die bewegungslosen Stäbchen im Blut die Krankheitserreger sind.

Unter dem Mikroskop beobachtete Koch am 12. April 1874 zum ersten Mal die Bildung von Sporen, die Form, in der diese Bakterien im Boden überdauern. Der Forscher stellte zudem fest, unter welchen Bedingungen die Bakterien sich am besten vermehrten und wann Sporen entstanden, und konnte schließlich den gesamten Lebenszyklus des Milzbrand-Bakteriums in Zeichnungen und Fotos darlegen. Unter Verwendung der Namensgebung des Breslauer Botanikers Ferdinand Cohn (1828–1898) für eine Anzahl von Mikroben nannte er den Erreger *Bacillus anthracis*.

Der erste Impfversuch gegen Milzbrand oder besser ein Vorversuch erfolgte wahrscheinlich 1878 in London. Die britischen Mediziner John Burdon-Sanderson (1828–1905) und William Greenfield (1846–1919) beobachteten, dass Rinder zwar erkrankten, den Milzbrand aber überstanden, wenn sie ihnen Blut von damit infizierten Nagern übertrugen. Vor allem aber wurden die Tiere später nicht mehr krank, wenn sie wieder verseuchtes Blut erhielten.

Greenfield versuchte dann, das Bakterium zu schwächen, indem er es über mehrere Zyklen in Glasröhrchen kultivierte. Anschließend spritzte er eine kleine Menge der Bakterien einem jungen Rind, das davon schwer krank wurde, sich aber innerhalb von zehn Tagen vollständig erholte. Demselben Tier injizierte er einige Wochen später die zermahlene Milz eines an Milzbrand verendeten Meerschweinchens – normalerweise ein Todesurteil. Das Rind erkrankte jedoch nur schwach und war schon nach zwei Tagen wieder gesund. Später konnten dem Tier weitere solche Injektionen nichts mehr anhaben. Wie die Studien ergaben, schwächte jeder Kultur-Zyklus den Erreger mehr, senkte also seine Virulenz, bis die Tiere davon schon beim ersten Mal überhaupt nicht mehr krank wurden. Trotzdem widerstanden sie in Zukunft Infektionen mit aggressiven Erregern.

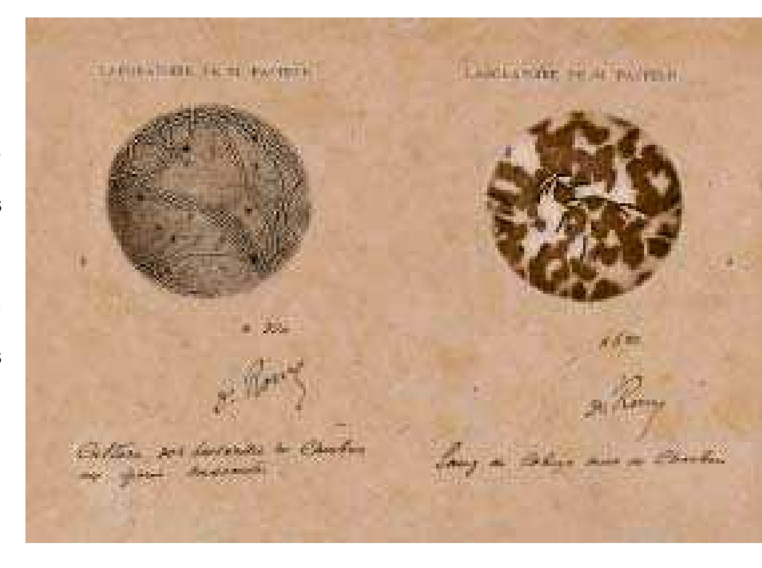
Zweifelhafter Ruhm

Als Greenfield diese Befunde 1880 in drei Publikationen veröffentlichte, kam er einem französischen Kollegen nur wenige Monate zuvor. Henry Toussaint (1847–1890) von der Tierärztlichen Schule von Lyon wendete andere Verfahren an, um einen Impfstoff mit einem abgeschwächten Erreger zu gewinnen. Er filterte das Blut von erkrankten oder eben verstorbenen Tieren, erhitzte es dann für zehn Minuten auf 55 Grad oder versetzte es mit Antiseptika. Wenn er dieses Substrat Tieren spritzte, waren sie zwölf Tage später immun gegen Milzbrand.

Toussaint legte seine Studien am 12. Juli 1880 bei der französischen Akademie für Medizin schriftlich vor, zusammen mit einer Darlegung der zukünftigen Bedeutung solcher Impfungen. Am 6. August 1880 impfte er sechs Schafe mit seinen „immunisierenden Flüssigkeiten“ – mit vollem Erfolg. Doch weder er noch Greenfield erhielten für ihr Pionierwerk Anerkennung. Statt ihrer heimste Louis Pasteur den Ruhm allein ein.

Pasteur war damals bereits berühmt, in hoher Stellung und Mitglied der französischen Akademie der Wissenschaften. Er hatte entdeckt, dass Mikroorganismen für die Zersetzung von organischen Stoffen verantwortlich sind und dass Hitze sie tötet. Diese Erkenntnis gilt als die Geburt der Mikrobiologie. Pasteur hatte die Seidenindustrie von Lyon gerettet, indem er die Erreger der Seidenspinner-Krankheit aufspürte. Er wies später auch – zusammen mit Émile Roux – nach, dass ein Bakterium, *Staphylococcus aureus*, eitrige Furunkel erzeugt. Und er hatte einen Impfstoff gegen die Hühner-Cholera hergestellt. Mitte der achtziger Jahre sollte er den ersten Impfstoff gegen Tollwut entwickeln.

1877 wurde er ersucht, ein Mittel gegen den Milzbrand bei Schafen und Rindern zu finden. Im März 1881, ein Jahr nach Toussaint und Greenfield, veröffentlichte er eine Arbeit, in der er eine Impfmethode beschrieb. Widersacher, die den erfolgreichen Wissenschaftler bloßstellen wollten, brachten ihn dazu, sein Verfahren öffentlich zu demonstrieren. Die berühmte Vorführung auf einem Gut bei Melon, bei der 25 Schafe gegen



So sah Émile Roux, ein Mitarbeiter von Louis Pasteur, den Erreger von Milzbrand unter dem Mikroskop. Links eine „Kultur des Milzbrand-Bakteridiums mit entstehenden Sporen“. Neben sich bildenden Sporen sieht man Filamente des infektiösen Bakteriums. Rechts eine Aufnahme von „Blut eines an Milzbrand gestorbenen Versuchstiers“. Auch darin sind Filamente zu erkennen.



INSTITUT PASTEUR

Sobald die Wirkung einer Impfung gegen Milzbrand erwiesen war, wurde in großen Mengen Impfstoff hergestellt und in Glasampullen abgefüllt.

Milzbrand geimpft wurden, fand am 5. Mai 1881 statt. Am 31. Mai wurde diesen Tieren und 25 nicht geimpften ein hochvirulenter Erregerstamm übertragen. Als sich das Publikum zwei Tage später wieder einfand, konnte es nur vermerken: Die geimpften Schafe waren gesund, die anderen tot.

Pasteur erhielt das Ordensband des Großen Kreuzes der Ehrenlegion und wurde in die Académie Française gewählt. Doch der Impfstoff war nicht von ihm selbst. Andere Wissenschaftler hatten ihn nach dem Prinzip und Verfahren von Toussaint entwickelt. Es handelte sich um eine Suspension von Bakterien ohne Sporen mit verringerter Virulenz. Adrien Loir, ein Neffe Pasteurs, der damals Medizin studierte, hat dies später enthüllt.

Heute weiß man, dass Impfen die einzige wirksame Vorbeugung gegen den Milzbrand ist. Zwei Sorten von Vakzinen stehen zur Verfügung: Lebend-Impfstoff mit einem abgeschwächten Stamm des Bazillus, vergleichbar den Aufbereitungen, die Toussaint und Pasteur verwendeten; und zellfreier Impfstoff, der also keine kompletten Bakterien enthält, sondern nur Bestandteile von ihnen.

Der Lebend-Impfstoff ist für den Menschen nicht zugelassen. Er birgt das Risiko, dass der verwendete Bakterienstamm wieder virulent wird. Auch erzeugt die Vakzine manchmal Fieber, Ödeme und schwere Schwächezustände. Zudem hält die Immunisierung damit leider nur etwa ein Jahr vor. Mit einem zellfreien Aufschluss dürfen Menschen geimpft werden. Tierversuche haben allerdings gezeigt, dass dies weniger wirksam ist als der abgeschwächte Lebend-Impfstoff.

Trotz Vorbeugung aller Art ist der Milzbrand auch heute nicht völlig besiegt. Selbst in Europa kann diese verheerende Krankheit, die eher in vergangene Epochen zu gehören scheint, plötzlich wieder auftauchen. Das beweist ein Ausbruch im Sommer 2000 in Rumänien.

Am 10. August jenes Jahres teilte das rumänische Gesundheitsministerium den Tod zweier Menschen durch Milzbrand mit. 21 weitere Personen waren zu der Zeit erkrankt und bei 24 stand die Diagnose noch aus. Das erste Opfer war ein junger Bauer im Osten des Landes. Er hatte den Kadaver einer Kuh seinen wenigen Schweinen verfüttert. Eine Woche später waren alle diese Schweine und noch fünf Kühe tot. Wenig später erkrankten zwei ältere Bauern zunächst an Haut-Milzbrand und starben dann an einer hämorrhagischen Meningitis.

INSTITUT PASTEUR

Diese Epidemie war die schwerste in Rumänien seit zwanzig Jahren. Für das Vieh wurde eine groß angelegte Impfkampagne gestartet. Zusätzliche drakonische Vorbeugungsmaßnahmen sollten eine Ausbreitung der Krankheit unterbinden. Auch die Menschen, die zu kranken Tieren Kontakt gehabt hatten, wurden prophylaktisch behandelt.

Testinsel für Jahrzehnte verseucht

Im Jahre 1925 unterzeichneten zahlreiche Staaten in Genf ein Abkommen über ein Verbot von chemischen und biologischen Kampfstoffen. Dies war eine Reaktion auf den Einsatz chemischer Waffen im Ersten Weltkrieg. Gleichwohl erfochten sich die Sowjetunion und die USA das Recht, solche Waffen im Ausnahmefall zu benutzen – also hierfür auch herzustellen und zu lagern –, vor allem falls sie selbst Ziel eines militärischen Angriffs würden.

Biologische Waffen gibt es noch nicht allzu lange. Forschungen über biologische Kriegsführung begannen 1929. Damals nahm die Sowjetunion ein wissenschaftliches Programm über militärisch verwendbare Bakterien auf, darunter die Erreger von Pest, Cholera, Typhus und Milzbrand. 1934 folgte Japan und 1939 England. Im Winter 1942, als der Zweite Weltkrieg auf dem Kontinent tobte, fuhren dem britischen Verteidigungsministerium unterstellte Wissenschaftler mehrmals nach Schottland zur Hebriden-Insel Gruinard, einem unbewohnten Eiland von ungefähr einem Kilometer Breite und drei Kilometern Länge. Sie ließen dort unter anderem sechs kleine Bomben mit Milliarden von Milzbrand-Sporen explodieren. Dass die Sporen der Explosion mit einer „klassischen“ Bombe widerstanden und dann ein stabiles Aerosol bildeten, war bereits erwiesen. Diese Sprengköpfe wurden jedoch auf einem Turm gezündet, um den herum Schafe in verschiedenen Abständen angepflockt waren.

Sämtliche Schafe starben wenige Tage darauf. Ihre Kadaver hinterließen auf der Insel eine erschreckende Menge an Bakterien und insbesondere Sporen. Vierzig Jahre lang entnahmen Wissenschaftler jährlich Bodenproben. Jedes Mal wiesen sie keimfähige Sporen von *Bacillus anthracis* nach. Noch 1979 waren große Teile der Insel völlig verseucht.

In den achtziger Jahren wurde beschlossen, die Insel zu säubern, was sich als sehr aufwendig herausstellte. Tests mit vier Bakterien tötenden Flüssigkeiten erwiesen, dass Formol sich am besten eignete. Also schlug und mähte man zunächst die Vegetation ab, verbrannte sie und vernichtete den Rest der Pflanzen mit Herbiziden. Dann wurde die Insel mit in Meerwasser verdünntem Formol besprengt. Die Säuberungsaktion hatte tatsächlich Erfolg. Nur an wenigen Orten der Insel ließen sich danach noch keimfähige Sporen nachweisen. Diese Stellen wurden so lange immer wieder behandelt, bis die Bakterien auch hier verschwunden waren. Alles in allem erforderte die Entseuchung sechs Wochen Arbeit, 280 Tonnen Formol und zwei Millionen Liter Meerwasser.

Acht Monate später begannen auf der Insel wieder Pflanzen zu wachsen, und bald konnte auch eine Herde Schafe auf ihr weiden. Die Tiere lebten dort fünf Monate und blieben vollkommen gesund. Der Milzbrand-Bazillus war wirklich verschwunden.

Japan tat sich bei der Entwicklung biologischer Waffen besonders hervor – ▶

ebenso bei „wissenschaftlichen“ Verfahren zum Massenmord. Schon 1935 entstand in der Mandschurei die Einheit 731, geleitet von dem Bakteriologen General Shiro Ishii, der an russischen, chinesischen, amerikanischen, australischen und englischen Gefangenen Experimente durchführte. Mehr als 3000 menschliche Versuchskaninchen wurden in den dortigen Lagern massakriert, lebend seziert, zu Tode gefroren oder mit verschiedenen Methoden infiziert, vor allem durch Aerosole von Krankheitserregern, darunter auch *Bacillus anthracis*. Zusätzlich starben in China und der Mandschurei 10 000 Menschen an Milzbrand, als die Japaner Dörfer angriffen und dabei Waffen mit dem Erreger einsetzten.

Im Zweiten Weltkrieg produzierten amerikanische, britische und kanadische Labors biologische Waffen, insbesondere „Milzbrand-Bomben“. Das Programm bekam den Codenamen „N“. 1944 waren Tausende dieser Bomben gegen Nazi-Deutschland einsatzbereit. Warum wurden sie nicht verwendet? Etwa deswegen, weil Hitlerdeutschland nicht über Bio-Waffen verfügte? Oder aus Angst, dass die damit bombardierten Gebiete dauerhaft verseucht würden? Möglicherweise. Gegen Ende des Krieges fanden unter strengster Geheimhaltung in der Umgebung von Poznan in Polen Forschungen auf dem Gebiet der biologischen Waffen statt. Auch da interessierte besonders der Milzbrand-Bazillus. Der Krieg ging zu Ende, bevor konkrete Resultate erzielt wurden.

Die biologische Kriegsführung dürfte schon deswegen für manche verlockend sein, weil die Produktion von Biowaffen im Verhältnis lächerlich billig ist. 1969 verglichen Spezialisten die Kosten einer militärischen Operation mit verschiedenen Waffentypen gegen eine Zivilbevölkerung, die eine Fläche von einem Quadratkilometer bewohnt. Die dafür benötigten klassischen Waffen würden 2000 Euro kosten, Nuklearwaffen 800 Euro, Nervengase 600 Euro – bakteriologische Waffen 1 Euro.

Warum ist ausgerechnet *Bacillus anthracis* so gefragt? Der Milzbrand-Erreger eignet sich schon deswegen als tödliche Waffe, weil die breite Bevölkerung gegen die Krankheit nicht immun ist. Die Inkubationszeit ist kurz und die Infektionsschwelle niedrig. Der Erreger ist hoch virulent, die durch ihn verursachte tödliche oder zumindest sehr schwere Erkrankung setzt die Menschen schnell außer Gefecht. Auch bleibt das pathogene Potenzial des Erregers bei der Herstellung, Lagerung und beim Transport erhalten. Die Sporen eignen sich für Aerosole, und sie bleiben lange gefährlich. Sie überstehen Austrocknung, Temperaturwechsel und UV-Licht und bewahren dennoch ihre Keimfähigkeit und Virulenz. Zudem lassen sich Stämme gewinnen, die gegen gebräuchliche Antibiotika resistent sind.

Die vertuschte Katastrophe im Ural

Nicht zuletzt machen den Milzbrand-Bazillus die niedrigen Herstellungskosten und die einfache Produktion attraktiv. Ein Gramm Sporen kann zehn Millionen Menschen töten. Da die Krankheit kaum ansteckend ist, besteht für die Aggressoren selbst wenig Gefahr. Manche nennen die Milzbrand-Bombe „Atombombe der Armen“. Wie groß die Gefahr ist, dass diese Waffe heimlich hergestellt wird, zeigte sich im Golfkrieg, als im Irak ein riesiges Arsenal an solcher Munition entdeckt wurde.

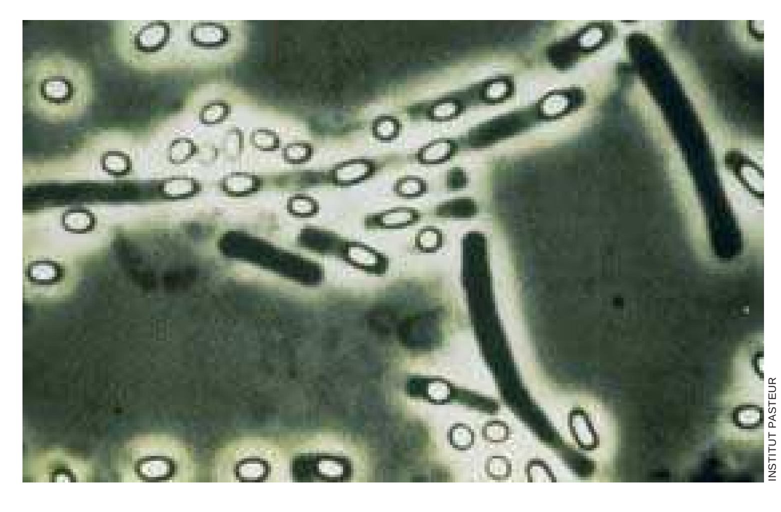
Das B-Waffen-Abkommen von 1972 unterzeichneten 130 Staaten. Es untersagt Entwicklung, Herstellung, Lagerung und Transport biologischer und toxischer Waffen. Gleichwohl halten sich viele Länder nicht daran, unter ihnen auch einige Unterzeichner-Länder wie China, Nordkorea, Indien, der Iran, Libyen und Syrien. Andere, die nicht beigetreten sind – Ägypten, Israel, Taiwan und viele weitere –, setzen ihre Forschungen fort. Der ehemalige Präsident der Vereinigten Staaten Richard Nixon schätzte 1969 den strategischen Wert der biologischen Waffen so gering ein, dass die Amerikaner damals alle Bio-Waffen und Vorräte an Agenzien zerstörten.

Doch zehn Jahre später nahmen die Vereinigten Staaten die Forschung am Milzbrand-Bazillus aus aktuellem Anlass wieder auf. Im April und Mai 1979 war die Krankheit in der Sowjetunion bei Swerdlowsk im Ural ausgebrochen, dem heutigen Jekaterinburg, einer Universitätsstadt mit 1,2 Millionen Einwohnern. Die sowjetischen Behörden schoben die Epidemie auf den Verzehr von „infiziertem Fleisch vom Schwarzmarkt“.

Damals war in der Region Milzbrand beim Menschen schon eine seltene Krankheit. Ein paar Kilometer vor der Stadt lag aber ein geheimes militärisches Produktionszentrum für bakteriologische Waffen. US-amerikanische Nachrichtendienste kamen bald zu dem Schluss, dass ein versehentlich freigesetztes Aerosol mit Milzbrand-Sporen, das die Menschen eingeatmet hatten, die Epidemie ausgelöst hatte.

Diese Einsicht verdankten sie dem Scharfblick der Pathologin Faina Abramowa, der Leiterin des anatomisch-pathologischen Dienstes im Krankenhaus der Stadt. Die Ärztin hatte die ersten 42 gemeldeten Todesfälle genau verfolgt und die ersten Autopsien durchgeführt. Sie erkannte, dass die Anzeichen für Milzbrand sprachen und konnte den Bazillus auch nachweisen. Sie fand heraus, dass diese Menschen Sporen eingeatmet haben mussten, denn sie waren sämtlich an Lungenmilzbrand gestorben. Die meisten Opfer hatten nahe des militärischen Labors gearbeitet oder gelebt. Doch die obersten sowjetischen Gesundheitsbehörden konfiszierten sogleich die gesamten Autopsieberichte und unterbanden jede Verbreitung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen.

Trotzdem gelang es den Ärzten, die mikroskopischen und eine Auswahl anderer charakteristischer pathologischer Präparate sowie ihre persönlichen Notizen zu verstecken. Erst 1992, unter Boris Jeltzin, wurde der Unfall offiziell zugegeben. Mit der Erlaubnis des sowjetischen Geheimdienstes KGB hieß es in der russischen Tageszeitung Prawda, „militärische Entwicklungsarbeiten“ seien der Grund der Katastrophe gewesen.



Filamente von *Bacillus anthracis* bei der Freisetzung von hell erscheinenden Sporen, etwa 2500fach vergrößert

INSTITUT PASTEUR



Wissenschaftler konnten 1992 das Beweismaterial vor Ort prüfen und die frühere ärztliche Diagnose bestätigen. Ihre Untersuchung ergab ferner, dass aus dem militärischen Forschungslabor eine sehr kleine Menge trockener Sporen in die Luft entwichen war. Die genaue Menge konnten sie nicht mehr ermitteln. Es waren aber genügend Sporen gewesen, um – nach den sowjetischen Quellen – 68 Menschen in den Tod zu ziehen, eine Herde Ziegen dahinzuraffen, die fünfzig Kilometer entfernt weidete, und in sechs Dörfern im Umkreis Tiere verenden zu lassen. Amerikanische Quellen gehen von tausend Opfern aus.

Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation würden 50 Kilogramm von *Bacillus anthracis*, bei günstigem Wind über einer Stadt mit 500 000 Einwohnern freigelassen, 95 000 Menschen töten und 125 000 weitere außer Gefecht setzen können.

Der Irak begann mit Experimenten zur Entwicklung von biologischen Waffen Ende der siebziger Jahre. Er untersuchte zunächst fünf Bakterienstämme und einen Pilzstamm, fünf Viren und vier Toxine. Zwei nicht-pathogene Bakterienarten, *Bacillus subtilis* und *Bacillus thuringiensis*, dienten zu Simulationen.

Zwei der pathogenen Bakterien wurden weiter verfolgt: *Bacillus anthracis* und *Clostridium perfringens*, das den Gasbrand verursacht, eine schwere Wundinfektion. Die Irakis bezogen die Milzbrand-Stämme aus den Vereinigten Staaten und aus Frankreich, verwendeten aber auch eigene Stämme.

Zwischen 1985 und 1991 produzierte der Irak 8000 Liter einer Suspension mit Milzbrand-Sporen in einer Konzentration von einer Milliarde Sporen pro Milliliter. 6000 Liter davon wurden auf R400-Bomben verteilt, von denen jede 85 Liter der Suspension enthielt, dazu Botulinus-Toxin, ein schweres, oft tödliches bakterielles Nervengift, und Aflatoxin, ein Schimmelpilzgift, das Leber und Nieren schädigt. Im Golfkrieg von 1991 wurden fünfzig mit Milzbrand-Sporen gefüllte R400-Bomben in Stellung gebracht, dazu 25 mit den Erregern bestückte ballistische SCUD-Raketen mit einer Reichweite von 300 Kilometern.

Begründete Angst vor Bioterror?

Nach Raymond Zilinskas von der Universität Maryland waren diese Waffen nicht einsetzbar. Sie hätten auch wohl nicht die erhoffte Wirkung gehabt, denn es waren für den Zweck zu wenig Bomben und Raketen, und die Verteilungsmechanismen dürften ineffizient gewesen sein. Nach dem Kriegsende gelang es nach Einschätzung von Experten nicht, das irakische Arsenal biologischer Waffen völlig zu vernichten. Auch wenn das irakische Programm zu deren Produktion zerschlagen worden sein sollte, konnte sicherlich ein Teil des Bestände auf die Seite geschafft werden.

Seit den neunziger Jahren setzten auch Terrororganisationen so genannte nicht-konventionelle – chemische und biologische – Kampfstoffe für ihre Ziele ein. Bei dem U-Bahn-Attentat am 20. März 1995 in Tokio tötete die japanische Aum-Sekte mit dem Nervengas Sarin zwölf Menschen und verletzte 5000. Dieselbe Sekte hatte 1990 in Tokio von einem Gebäude Milzbrand-Bazillen ausgestreut und einige Monate zuvor beim japanischen Parlament Botulinus-Toxin verteilt, in diesen Fällen ohne Opfer.

Nicht nur die lange bekannten Krankheitserreger finden bei Terrorgruppen Gefallen, sondern auch erst in neuerer Zeit bekannt gewordene tödliche so genannte hämorrhagische Viren, wie die Erreger des Ebola- oder des Hanta-Fiebers, und selbst Grippe-Viren. Solches Material zu erwerben, ist mit genügend Geld durchaus möglich. Viele Länder stellen heimlich Biowaffen her: Bulgarien, China, Nordkorea, Kuba, Ägypten, Indien, Iran, Israel, Laos, Libyen, Syrien, Taiwan und Vietnam.

Man könnte *Bacillus anthracis* als das Urbild eines bakteriologischen Kampfstoffs bezeichnen. Ein beinahe behelfsmäßiges kleines Labor genügt, um ohne große Mittel in kurzer Zeit massenhaft Bakterien und Sporen zu züchten.

Seit ungefähr fünfzig Jahren war der Milzbrand in den Industriestaaten weit gehend verschwunden. Nur vereinzelt trat er noch auf. Die Epidemie in Rumänien im August 2000 war vermutlich die einzige in Europa in den vergangenen zwanzig Jahren. Ein Fall von Haut-Milzbrand in Frankreich liegt mehrere Jahre zurück. In der Schweiz infizierten sich Ende der siebziger Jahre mehrere Arbeiter durch Tierhäute aus Südostasien. Die Vereinigten Staaten registrierten seit 1900 nur 18 Fälle von Lungen-Milzbrand, den letzten davon im Jahr 1978.

Doch als Vernichtungswaffe ist *Bacillus anthracis* eine besonders heimtückische Bedrohung. Wenn man sie bemerkt, ist es oft schon zu spät. Zwar gibt es für die Zivilbevölkerung Schutzmöglichkeiten: Die Produktion von Impfstoffen, Antibiotika, Gasmasken, Schutzkleidung und anderen Hilfsmitteln läuft derzeit vielfach auf Hochtouren. Doch muss diese Ausstattung unentwegt dem Stand der Biowaffen angepasst und entsprechend nachgebessert werden. Denn von den Fortschritten in Genetik und Molekularbiologie profitieren auch die Hersteller unkonventioneller Waffen. Russische Forscher im Institut von Obolensk bei Moskau haben gentechnisch schon einen Milzbrand-Stamm erzeugt, gegen den Antibiotika wie auch eine Impfung nichts ausrichten. ■

Willy Hansen *war Arzt am Universitäts-Krankenhauszentrum Brugmann in Brüssel.* **Jean Freney** *ist Universitätsprofessor und Krankenhausarzt am Labor für Mikrobiologie der Édouard-Herriot-Klinik in Lyon.*

Literaturhinweise

Milzbrand. In: Geißeln der Menschheit. Kulturgeschichte der Seuchen. Von Stefan Winkle. Artemis und Winkler, 1997.

Robert Koch. Von Wolfgang Genschorek. Hirzel, 4. Aufl., 1981.

Chemical and Biological Warfare. Von Eric Croddy et al. Springer, 2002.

Anthrax as a potential biological warfare agent. Von J. Pile et al. in: Arch. Intern. Med., Bd. 158, S. 429, 1998.

Bacillus anthracis *et guerre biologique. Von F. Ramisse et al. in: Bull. Soc. Fr. Microbiol., Bd. 13, S. 145, 1998.*

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*


M. ABBEY / NAS / OKAPIA

MILZBRAND

Heimtückischer Stratege

Sobald der Erreger des Milzbrands den Körper überschwemmt, ist eine Rettung kaum mehr möglich. Wie überlistet *Bacillus anthracis* das Immunsystem? Trotz der neuesten Erkenntnisse birgt sein ausgefeiltes strategisches Vorgehen noch immer einige Rätsel.

Von Michèle Mock

Im Jahr 1842 erblickte der französische Tierarzt Mamert Onésine Delafond (1805–1861) wohl als einer der Ersten jene Geißel, die damals das Vieh noch oft binnen Tagen dahinraffte: Unter seinem Mikroskop entdeckte er im Blut von erkrankten Tieren kleine Stäbchen. Aber er verwarf den Gedanken, die Verursacher dieser damals noch recht häufigen Tierseuche vor sich zu haben. Erst Jahrzehnte später erkannten sein Landsmann, der Mediziner Casimir-Joseph Davaine (1812–1882), und der deutsche Arzt Robert Koch (1843–1910), dass diese auffälligen Partikel Krankheitskeime sind, die Tier und Mensch mit Milzbrand infizieren können. Koch nannte den Erreger *Bacillus anthracis*. Er klärte auch den Lebenszyklus dieses Bakteriums auf (siehe den vorigen Artikel), das als Spore im Boden oder in Tierfellen jahrzehntelang überdauern kann, sich aber nur in Säugetieren vermehrt.

Doch erst jetzt erkennen Wissenschaftler das wahre Gesicht des Erregers. Sie beginnen zu verstehen,

➤ wie es dem Milzbrand-Bazillus gelingt, sich fast unbemerkt vom Immunsystem im Körper zu verbreiten,
➤ wie er seine Gifte in die Zellen einschleust und
➤ wie diese verheerenden Stoffe aussehen und wirken.

Zwar gibt es gegen Milzbrand Impfstoffe, und im Frühstadium lässt sich eine Infektion mit Antibiotika bekämpfen. Wird die Erkrankung aber nicht sofort erkannt – weil die Symptome anfangs denen einer Grippe oder Darmverstimmung ähneln – und überschwemmen die Toxine schon die Körperzellen, kommt oft jede Hilfe zu spät. Die Erforschung des molekularen Geschehens soll Wege eröffnen, bereits erkrankte Menschen und Tiere zu retten.

Solche Studien werden seit den achtziger Jahren vorangetrieben, weil der Milzbrand-Bazillus als biologische Waffe von Militärmächten sowie in den letzten Jahren auch von Terrororganisationen eine Bedrohung darstellt (siehe auch Seite 34, und: „Milzbrand: Nur der Anfang?“ SdW 12/01, S. 86; „Zwischen Massenpanik und Massenmord“, SdW 1/2002, S. 93).

Von allen Bazillen dieser Gruppe, die für den Menschen gefährlich werden können, ist eine Infektion durch *Bacillus anthracis* am meisten zu fürchten. Die Zellen sind für Bakterien recht groß: Sie werden bis zu 10 µm (Mikrometer, tausendstel Millimeter) lang und etwa 1 µm dick. Sie keimen aus den sehr widerstandsfähigen Sporen aus, wenn diese in ein Säugetier gelangen.

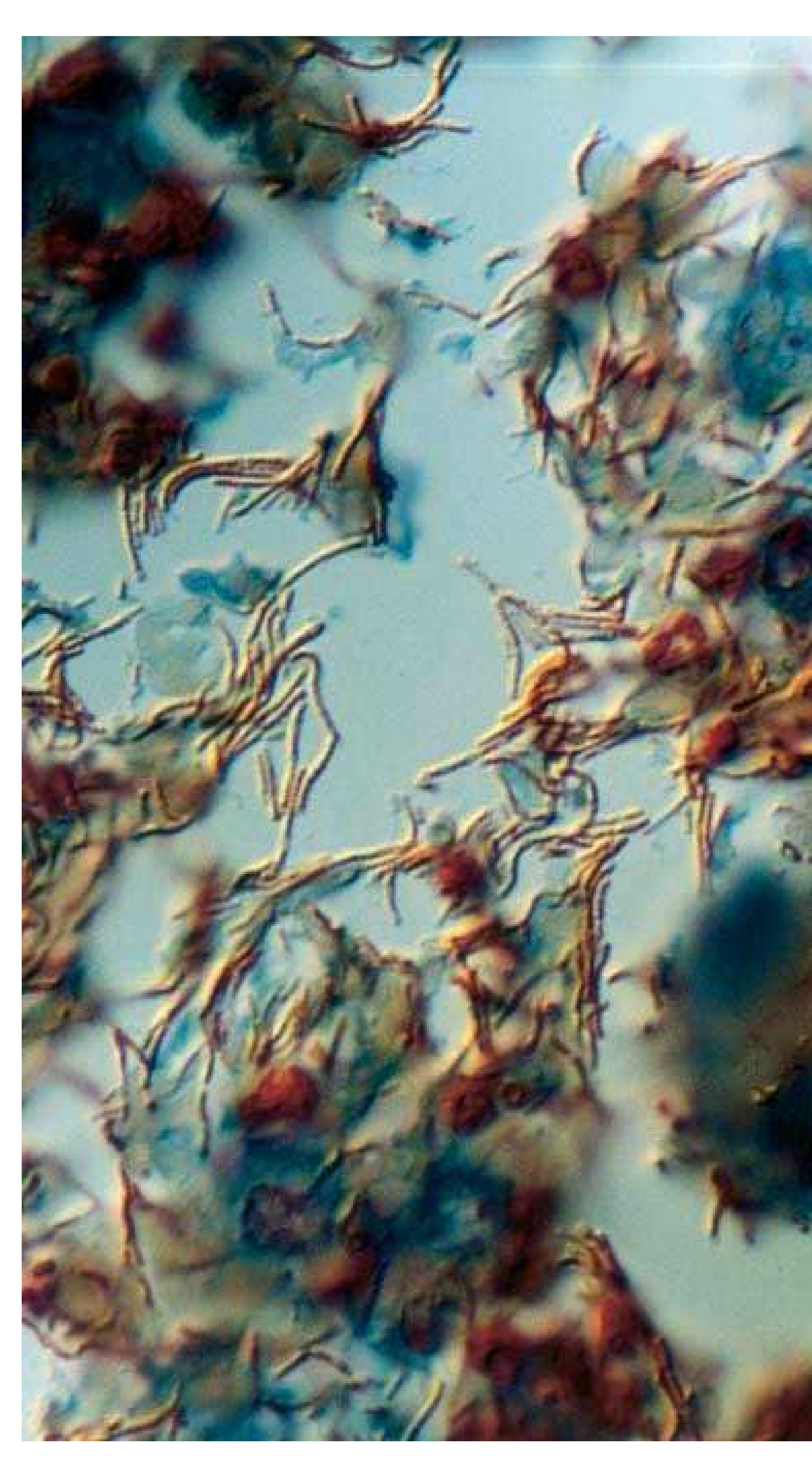
Um sich im Wirtsorganismus zu behaupten, hilft dem Erreger eine äußere Kapsel, welche die für Bakterien übliche Zellwand und unter ihr befindliche Zellmembran umkleidet und die Zelle zusätzlich schützt. Die Kapsel – aus langen Filamenten eines Polymers der Gamma-D-Glutaminsäure – hüllt das Bakterium wie ein Pelzmantel ein (Bild Seite 43).

Diese Schutzhülle, die im Jahre 1903 das erste Mal beschrieben wurde, ist für krankheitserregende Bakterien charakteristisch. Sie verhindert, dass die Makrophagen, Fresszellen des Immunsystems, den Eindringling beseitigen. Hinzu kommt, dass die langen Filamente die Antikörperbildung durch das Immunsystem kaum anregen. So kann sich der Erreger fast ungestört vermehren.

Mehrfacher Schutzwall

Zwischen Kapsel und Zellwand liegt beim Milzbrand-Erreger außerdem eine so genannte S-Schicht (Bild Seite 42 oben links). Dies kommt bei kapselbewehrten Bakterien selten vor und ist in dem Fall eine Besonderheit von *Bacillus anthracis*. Seine S-Schicht besteht aus einer Lage zweier so genannter Glykoproteine, die sich kristallartig als Sechsecke zusammenlagern. Ob diese Schicht dem Milzbrand-Erreger seine Form gibt, ob sie als Filter für Moleküle dient oder ob sie die Aggressivität – die so genannte Virulenz – des Bazillus erhöht, ist noch nicht klar. Wahrscheinlich steigert sie seine Widerstandsfähigkeit gegen Angriffe des Immunsystems. Diese Schicht hat aber keinen Einfluss darauf, in welcher Dosis der Erreger tödlich wirkt.

Jedes der beiden Proteine für sich kann eine S-Schicht bilden. Das eine stellen die Zellen des Milzbrand-Bazillus anfangs her, während sie sich bei einer Infektion zunächst rasch vermehren. Später, wenn sie aufhören, sich zu ▶

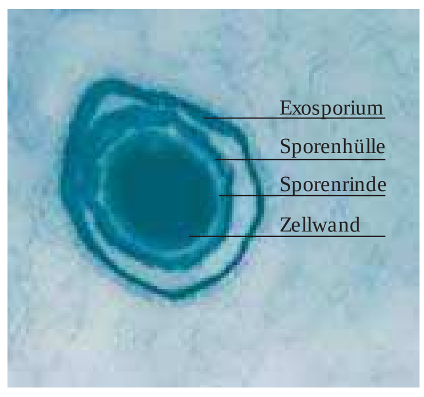


Diese in Filamenten zusammengelagerten Milzbrand-Bazillen bilden so genannte Endosporen aus – ein Zeichen für sich verschlechternde Lebensbedingungen.

Eine der Schutzhüllen von *Bacillus anthracis*, die S-Schicht, besteht aus einem Netz von kristallinen Proteinen. Hier löst sie sich nach einer chemischen Behandlung von der Zelle ab.



INSTITUT PASTEUR



Eine geschnittene Spore des Milzbrand-Erregers unter dem Elektronenmikroskop. Ihre einzelnen Hüllen verleihen ihr große Widerstandsfähigkeit.

teilen, wird dieses nach und nach durch das andere Protein ersetzt. Der Sinn dieses Verhaltensmusters ist allerdings noch nicht aufgeklärt. *Bacillus anthracis* ist das einzige bekannte Bakterium, das diese beiden Moleküle herstellt.

Völlig anders als die aktiven Bakterien sehen die Sporen aus (siehe dazu Bild oben rechts), der Dauerzustand, in dem der Bazillus widrige Zeiten übersteht, zum Beispiel Nahrungsmangel überbrückt, aber auch hohe Temperaturen, ultraviolette Strahlung und viele aggressive Chemikalien aushält. Zur Sporenbildung, die in dem Fall vollständig innerhalb der Bakterienzelle abläuft (man spricht deshalb von Endosporen), braucht der Erreger Sauerstoff. Zunächst verdichtet sich das genetische Material des Bakteriums, dann wird es mitsamt ein paar Enzymen von zwei Schutzschichten umgeben, der Sporenrinde und der Sporenhülle. Anschließend zerstört sich die restliche Zelle selbst mit Hilfe von Enzymen. Die nun entstandene Spore als solche kann sich nicht vermehren.

Nur bei Bakterien der Gruppe, zu der *Bacillus anthracis* gehört, besitzen die Sporen ganz außen noch eine weitere Hüllschicht: das so genannte Exosporium. Dieses enthält zum größten Teil Proteine und besteht aus drei Lagen einer hexagonalen Struktur, die mit fadenartigen Anhängen bedeckt ist. Mit diesen Fäden kommen die Zellen des infizierten Tieres als Erstes in Kontakt.

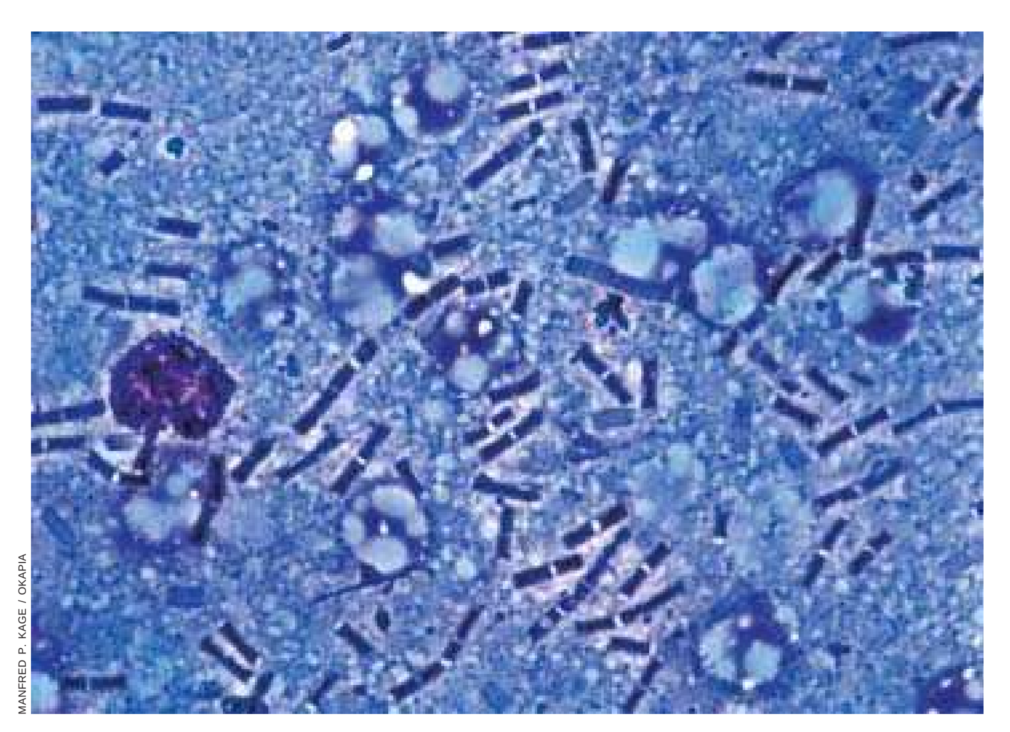
Die Krankheit der Wollsortierer

Das Exosporium dürfte als Filter dienen, das Abwehrenzyme des Wirtes abfängt und so verhindert, dass diese die tieferen Schichten der Sporen angreifen, also die Sporenhülle und die Sporenrinde. Außerdem könnte es den Sporen dabei helfen, sich auf den Zellen des Wirts festzusetzen.

Die Sporenoberfläche von *Bacillus anthracis* bewirkt auch, dass die Sporen aneinander haften. Dann entstehen Aggregate, die zu schwer sind, um in der Luft zu schweben. Beim Einsatz als Biowaffe sollen die Milzbrand-Sporen aber gerade mit der Atemluft in die Lunge gelangen. Sie werden zu dem Zweck mit einer Substanz überzogen, die das Verkleben verhindert.

Früher zogen Menschen sich Lungenmilzbrand oft bei der Arbeit mit Fellen, Wolle und Lumpen zu. In England hieß diese Form entsprechend „Krankheit der Wollsortierer“, in Deutschland Hadernkrankheit. Außer über die Lunge können die Sporen auch über den Verdauungstrakt oder durch kleine Hautwunden in den Körper dringen. Der meist etwas weniger gefährliche Hautmilzbrand war früher eine häufige Berufskrankheit von Gerbern und Lumpensammlern. An Darmmilzbrand erkrankten Menschen, die verseuchtes Fleisch gegessen hatten.

Im Körper werden die Sporen rasch von den Makrophagen aufgenommen und dabei in ein abgeschnürtes Membranbläschen, ein Vesikel, im Zellinnern eingeschlossen (Bild Seite 44). Diese Reaktion der Immunzellen zu provozieren, gehört zur Strategie von *Bacillus anthracis*, das sich im Gegensatz zu anderen Bazillus-Arten seiner Gruppe nicht außerhalb von Organismen vermehrt. Denn die Dauerformen geben erst jetzt ihr Ruhestadium auf und keimen: Sie schwellen an, die Sporenhülle zerreißt und der Stoffwechsel setzt allmählich wieder ein. Schließlich erscheint die vegetative Form, das aktive Bakterium. Die Keimung geschieht offenbar in Reaktion auf ein Wirtssignal hin. Wissenschaftler



MANFRED P. KAGE / OKAPIA

Bacillus anthracis **bildet im Körper kurze Ketten, wie in diesem Milzausstrich sichtbar. Im fortgeschrittenen Krankheitsstadium wirkt die Milz wie verbrannt.**

haben kürzlich bei dem Erreger eine Proteinfamilie identifiziert, die für die betreffenden Signalmoleküle Erkennungsstrukturen bildet.

Die Keimung von Milzbrand-Sporen dauert im Mittel dreißig Minuten. Im Säugerorganismus herrschen dazu beste Bedingungen. In der Laborkultur sind die optimalen Voraussetzungen ein leicht saures Milieu und eine Temperatur von 37 Grad Celsius. Schon während des Keimens aus der Spore setzt der Milzbrand-Erreger Toxine frei.

Bacillus anthracis produziert drei verheerende Proteine: das schützende (protektive) Antigen, den Ödem-Faktor und den tödlichen (lethalen) Faktor. Einzeln sind diese Moleküle harmlos. Sie richten nur als Zweierpack Schaden an, wenn nämlich das schützende Antigen entweder kombiniert mit dem Ödem-Faktor oder zusammen mit dem Lethal-Faktor auftritt. Dabei ermöglicht das schützende Antigen den beiden anderen Proteinen, in die Wirtszelle einzudringen und dort wichtige Abläufe zu stören.

Nach gleichem Prinzip funktionieren viele Bakterien-Toxine. Allerdings vereint bei den meisten ein und dasselbe Molekül beide Funktionen: Ein Teil des Moleküls erlaubt das Eindringen in die Zelle, ein anderer sorgt im Zellinnern für das Desaster.

Das schützende Antigen erhielt seinen Namen, weil es beim Wirtsorganismus die Synthese von Antikörpern auslöst, also einen Schutzmechanismus des Immunsystems anregt.

Die eigentliche Verheerung richten die beiden anderen Proteine an. Spritzt man einem Tier unter die Haut zusammen mit dem Schutz-Antigen den Ödemfaktor, bilden sich an der Einstichstelle große Ödeme, also Schwellungen durch Gewebewasser. Die Kombination von Schutz-Antigen und lethalem Faktor, intravenös verabreicht, wirkt für den Organismus tödlich.

Steckbrief

➤ Das Bakterium

Der Erreger des Milzbrands, *Bacillus anthracis*, ist ein Mitglied der *Bacillus-cereus*-Gruppe. Es handelt sich um ein unbewegliches, stäbchenförmiges, so genanntes grampositives Bakterium von 3 bis zu 10 Mikrometer Länge und rund einem Mikrometer Durchmesser. Im Blut bilden die Bakterienzellen kurze Ketten.

Besondere Hüllschichten schützen die Zelle zum Beispiel vor Angriffen des Immunsystems und ermöglichen das Eindringen in den Wirt: die S-Schicht, die aus den beiden Proteinen Sap und EA1 besteht, sowie die äußere Kapsel aus Polymeren der D-Glutaminsäure (Bild).

➤ Die Sporen

Unter widrigen Bedingungen bilden die Bakterien in ihrem Innern so genannte Endosporen. Diese Sporen sind äußerst widerstandsfähig (siehe Bild Seite 42 oben rechts). Im Boden, aber etwa auch in Lumpen, überdauern sie Jahrzehnte und wahrscheinlich noch viel länger.

➤ Die Krankheit

Früher war Milzbrand eine häufige Infektionskrankheit von Weidevieh, die immer wieder seuchenartig auftrat. Menschen steckten sich meist durch Tierprodukte an, etwa durch Verzehr von rohem Fleisch, besonders aber an Tierhäuten oder Wolle.

Zur Vermehrung benötigt der Milzbrand-Bazillus Säugetiere als Wirte. Meist erfolgt die Infektion durch Sporen. Diese keimen im Wirt zu aktiven Bakterien aus, deren Toxine Signalketten in Zellen zerstören.

Drei Toxine sind am Werk: Das schützende Antigen, der Ödem-Faktor und der Lethal-Faktor (Bild Seite 44).

Die Infektion erfolgt über kleine Hautwunden („Haut-Milzbrand“), über die Lunge („Lungen-Milzbrand“) oder den Darm („Darm-Milzbrand“).

Die Inkubationszeit beträgt einen bis wenige Tage. Beim Hautmilzbrand entstehen zunächst kleine Pusteln, später große eitrige Karbunkel. Lungenmilzbrand beginnt mit grippeähnlichen Symptomen, Darmmilzbrand auch mit blutigen Durchfällen. Der Tod kann binnen Stunden eintreten. Dann sind Blut und Milz mit Bakterien übersät.



INSTITUT PASTEUR

Eine Zelle von *Bacillus anthracis* im Querschnitt, mit einem Durchmesser von etwa einem Mikrometer. Die Zelle ist von einer Kapsel aus langen Filamenten umhüllt (blau angefärbt).

Listenreiches Eindringmanöver

Das schützende Antigen des Milzbrand-Bazillus lagert sich an ein bestimmtes Membranprotein der Fresszellen an, den Anthrax-Toxin-Rezeptor (ATR). Dieses Protein bilden alle Säugetierzellen. Erst vor kurzem konnte eine Gruppe um John Young von der Universität von Wisconsin in Madison diesen Rezeptor identifizieren. Eine nach außen ragende Domäne dieses Membranproteins ähnelt einem Blutgerinnungsfaktor, dem Von-Willebrand-Faktor. Im Laborversuch gelang es, kultivierte Zellen vor den Milzbrand-Toxinen zu schützen, indem man eine lösliche Version dieses äußeren Abschnitts dazugab. Vermutlich wurde der Toxin-Komplex davon abgefangen.

Hat sich das schützende Antigen jedoch an eine Zelle angeheftet, zerlegt ein Enzym es in zwei ungleiche Stücke (siehe Bild Seite 44). Das kleinere, PA 20, wird verworfen. (PA steht für protektives Antigen, die Zahl bezieht sich auf das Gewicht des Moleküls.) Das größere Fragment, PA 63, bleibt an den Rezeptor gebunden. Jeweils sieben PA 63-Moleküle formen nun zusammen einen zylindrischen Komplex, ein Heptamer. Das ist die entscheidende Struktur, an die sich bis zu sieben Moleküle des Ödem-Faktors beziehungsweise des Lethal-Faktors binden. Die Zelle holt dieses Arrangement in ihr Inneres, indem sie ihre Außenmembran an der Stelle zu einem Bläschen einstülpt. Als Nächstes wird das Milieu im Bläschen saurer. Nun entfaltet jedes der sieben PA 63-Moleküle eine bisher zusammengelegte Schleife, die sich in die Membran des Bläschens schiebt. Dadurch entsteht eine Pore, durch die der Ödem-Faktor beziehungsweise der Lethal-Faktor in die Zelle schlüpft.

Wie diese beiden eigentlichen Zellgifte, zwei Enzyme, ihr Werk verrichten, ist erst teilweise aufgeklärt. Der Ödem-Faktor ist eine Adenylatcyclase. Das heißt, dass er den Energieträger Adenosin-Triphosphat (ATP) in zyklisches Adenosin-Monophosphat (cAMP) um- ▶

wandelt, ein wichtiges Signalmolekül von Zellen. Dazu benötigt er aber Calmodulin, das sich an ihn binden muss. Dieses Protein besitzen nur Zellen von Organismen mit abgegrenztem Zellkern, also nicht Bakterienzellen. Hiermit dürfte zusammenhängen, dass sich *Bacillus anthraci*s nur in höheren Organismen vermehrt, in dem Fall nur in Säugetieren. Im Gegensatz zu anderen Bakterien der Gruppe verlangt sein Lebenszyklus offenbar einen Wirt.

Die intrazelluläre Konzentration des Signalstoffs cAMP steigt nun rasch an. Dadurch erhöht sich die Ionen-Konzentration außerhalb der Zellen übermäßig. Zum Ausgleich wird Zellen und Blutplasma Wasser entzogen: Ödeme entstehen. Die viele freie Flüssigkeit dürfte es den Bakterien leicht machen, sich in den Geweben zu verteilen. Weitere Studien haben zudem gezeigt, dass der Ödem-Faktor Zellen daran hindert, größere Partikel aufzunehmen, sie also regelrecht aushungert.

Bei dem lethalen (tödlichen) Faktor handelt sich um eine Protease – ein Enzym, das Proteine zerschneidet. Die Protease enthält im katalytischen Zentrum ein Zinkatom. Erst vor wenigen Monaten konnte ein Forscherteam um Robert Liddington vom biomedizinischen Forschungsinstitut Burnham in La Jolla (Kalifornien) die Struktur dieses Moleküls aufklären. Der Lethal-Faktor zerschneidet ein Protein, das bei der Weiterleitung von Botschaften mitwirkt, die bei der Zelle eintreffen und zum Zellkern übermittelt werden müssen. Es gehört zu einer MAPKK genannten Proteinfamilie, deren Mitglieder alle an solchen Signalkaskaden beteiligt sind. Die Zerstörung dieses Proteins unterbindet folglich mindes-tens einen wichtigen Signalweg innerhalb der Zellen.

Molekulare Ziele für neue Medikamente

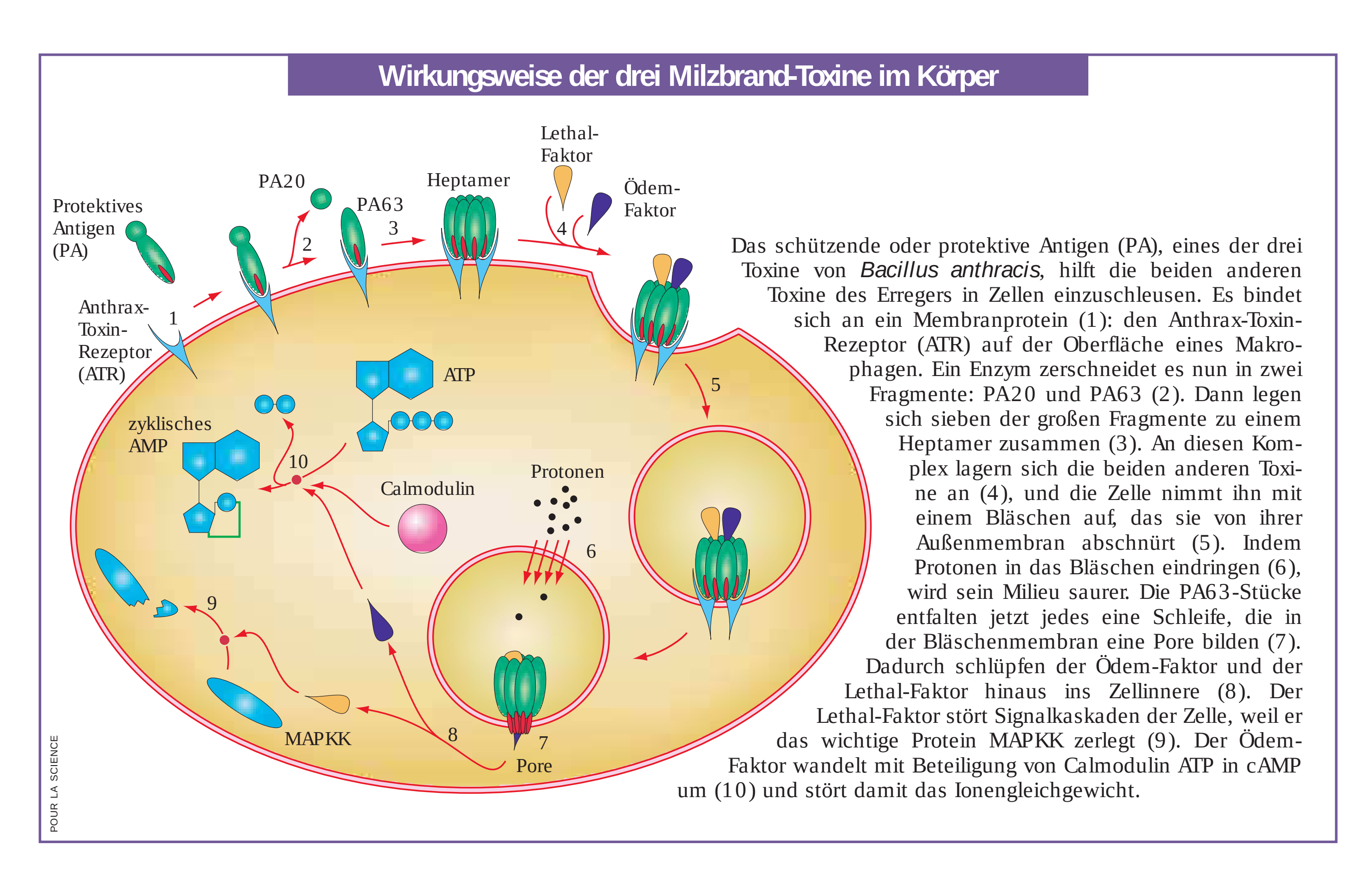
Der lethale Faktor besteht aus vier Domänen. Domäne I bindet sich an das schützende Antigen, das ihn in die Wirtszellen einschleust. Die drei anderen Domänen bilden eine Rinne, in die ein Ende der MAPKK hineingerät – und wo dieses Protein dann zerschnitten wird (siehe Bild unten). Die Domänen II und III ähneln einander: Vielleicht ist die eine aus einer Verdopplung der anderen hervorgegangen. Die vierte Domäne enthält das Zinkatom: Sie ist das Messer, das die MAPKK schneidet. Die Struktur des lethalen Faktors lässt vermuten, dass er unter anderem durch Verdopplung eines Gens entstand. Mutationen und Verschmelzungen von Genabschnitten dürften ihm zu seiner außergewöhnlichen Spezifität verholfen haben.

Leider weiß man noch nicht, welche Signalkette der lethale Faktor zerstört, wenn er das erwähnte Protein lahm legt. Fest steht nur, dass dieser Faktor bei der tödlichen Wirkung von *Bacillus anthracis* ein Schlüsselelement darstellt.

Klar ist auch, dass er es auf weitere Moleküle in den Zellen abgesehen hat. Zweifellos stehen die Fresszellen des Immunsystems – die Makrophagen – bei Milzbrand im Zentrum des Krankheitsgeschehens. Warum zerstört der Erreger unseres Wissens fast ausschließlich diese Immunzellen, obwohl auch die anderen Körperzellen das Erkennungsmolekül für das schützende Antigen tragen, mit dessen Hilfe die Toxine ins Zellinnere eindringen?

Anscheinend sind die durch den Lethal-Faktor zerrütteten Signalwege für die Herstellung von Cytokinen wichtig, jenen maßgeblichen Immunmolekülen, welche die Kommunikation innerhalb des Immunsystems und damit seine Reaktionen in vielfältiger Weise beeinflussen. Möglicherweise sorgt der lethale Faktor in den ersten Stadien der Infektion dafür, dass die Bakterien sich

Wirkungsweise der drei Milzbrand-Toxine im Körper



Das schützende oder protektive Antigen (PA), eines der drei Toxine von *Bacillus anthracis*, hilft die beiden anderen Toxine des Erregers in Zellen einzuschleusen. Es bindet sich an ein Membranprotein (1): den Anthrax-Toxin-Rezeptor (ATR) auf der Oberfläche eines Makrophagen. Ein Enzym zerschneidet es nun in zwei Fragmente: PA20 und PA63 (2). Dann legen sich sieben der großen Fragmente zu einem Heptamer zusammen (3). An diesen Komplex lagern sich die beiden anderen Toxine an (4), und die Zelle nimmt ihn mit einem Bläschen auf, das sie von ihrer Außenmembran abschnürt (5). Indem Protonen in das Bläschen eindringen (6), wird sein Milieu saurer. Die PA63-Stücke entfalten jetzt jedes eine Schleife, die in der Bläschenmembran eine Pore bilden (7). Dadurch schlüpfen der Ödem-Faktor und der Lethal-Faktor hinaus ins Zellinnere (8). Der Lethal-Faktor stört Signalkaskaden der Zelle, weil er das wichtige Protein MAPKK zerlegt (9). Der Ödem-Faktor wandelt mit Beteiligung von Calmodulin ATP in cAMP um (10) und stört damit das Ionengleichgewicht.



zunächst ungestört vermehren können. Später, wenn die Milzbrand-Erreger den Organismus überschwemmen, gehen die Fresszellen an der nun hohen Konzentration des lethalen Faktors zu Grunde. Dann werden unvermittelt riesige Mengen von entzündungsfördernden Stoffen frei, TNF-alpha, Interleukin 1 sowie Stickstoffmonoxid. Dies bewirkt einen Schock: Der Blutdruck sackt plötzlich stark ab, in der Lunge sammelt sich Wasser, und die feinen Blutkapillaren werden blockiert. Die Konsequenz: Der Organismus leidet Sauerstoffmangel. Auch das Herz ist dadurch geschwächt und kann den Mangel nicht ausgleichen. Der Infizierte stirbt.

Die Art, wie *Bacillus anthracis* seine Opfer tötet, ist außergewöhnlich kompliziert. Ohne ein besonderes genetisches Erbe wäre ihm dies nicht möglich. Und zwar verdankt der Bazillus seine gefürchteten Eigenschaften zwei Plasmiden, Ringen aus DNA, die er zusätzlich zu seinem Bakteriengenom besitzt und die sich unabhängig davon vermehren. Eines der beiden Plasmide, genannt pXO2, trägt die Gene für die Enzyme zur Herstellung und zum Abbau der Kapsel, ein Prozess, der ständig im Gleichgewicht ablaufen muss.

Das andere Plasmid, pXO1, enthält die Gene für die drei Toxine. Auf ihm liegen auch Gene, deren Produkte an der Sporenkeimung beteiligt sind und dabei auf molekulare Signale des Wirts reagieren. Des Weiteren sitzt auf diesem Plasmid ein Gen für ein Regulator-Protein, das die Herstellung der Toxine und der Kapsel fördert.

Hochvirulente Stämme des Milzbrand-Erregers unterscheiden sich von weniger gefährlichen dadurch, dass sie beide Plasmide zugleich besitzen. Jedoch weisen die einzelnen Stämme von *Bacillus anthracis* auch feinere Unterschiede auf. Der Milzbrand-Bazillus enthält in seinem Erbmaterial Gene mit so genannten repetitiven Sequenzen, aber die Anzahl dieser Wiederholungen kann variieren. Das beeinflusst zwar nicht die Toxizität eines Stammes. Man erkennt daran aber seine Herkunft. Mikrobiologen haben einen phylogenetischen Stammbaum aufgestellt, der die einzelnen Stämme von *Bacillus anthracis* nach ihrem geografischen Ursprung ordnet. Zum Beispiel ergaben solche Analysen, dass die jüngst in den USA verschickten mit Milzbrand verseuchten Briefe möglicherweise den Stamm AMES enthielten, eine sehr virulente Version, die in den fünfziger Jahren im US-Bundesstaat Iowa isoliert wurde. Dieser besonders gefährliche Stamm wurde seitdem in den Labors am häufigsten untersucht.

Blick ins Innerste des Feindes

Obwohl *Bacillus anthracis* für sein Vernichtungswerk ein so hervorragendes Rüstzeug besitzt, ist der Erreger trotzdem nicht unverletzlich. Wissenschaftler operieren an zwei Fronten, um sich gegen den lebensgefährlichen Krankheitskeim zu wappnen: Das sind zum einen antibakterielle Wirkstoffe, zum anderen Impfstoffe.

Zahlreiche Antibiotika wirken gegen *Bacillus anthracis* – zum Beispiel Ciprofloxacin von Bayer, aber auch Doxycyclin von Pfizer. Jedoch helfen sie nur, wenn sie frühzeitig angewendet werden. Der Grund: Sie blockieren zwar die Vermehrung der Bakterien, schützen aber nicht vor bereits freigesetzten Toxinen. Deswegen suchen Wissenschaftler nach Wegen, diese Moleküle gezielt unschädlich zu machen.

Das Interesse der Forscher richtet sich vor allem auf das schützende Antigen, weil es die anderen beiden Toxine in die Wirtszellen einschleust. Gleichzeitig mit ihm würden diese eigentlichen Zerstörer ausgeschaltet. Kürzlich stellte das Team von John Collier von der Harvard-Universität in Cambridge (US-Bundesstaat Massachusetts) einen Hemmstoff gegen dieses Molekül vor, der sich an Stelle des Rezeptors von Säugetierzellen an das schützende Antigen bindet. Im Test an Ratten bewirkte dieser Hemmstoff, dass den Tieren erst wesentlich höhere Dosierungen von Lethalfaktor kombiniert mit dem Schutz-Antigen gefährlich wurden als normalerweise.

Tiere werden gegen Milzbrand mit abgeschwächten, so genannten attenuierten Bakterien geimpft. In dem Fall fehlt dem Erreger das Plasmid pXO2. Bisherige Impfstoffe für den Menschen dagegen enthalten zur Sicherheit gar keine ganzen Zellen. Im Wesentlichen bestehen sie aus dem schützenden Antigen. Allerdings sind diese zellfreien Impfstoffe viel weniger wirksam. Und leider hängt die durch das Impfen erzielte Schutzwirkung nicht davon ab, wie viele Antikörper gegen das fremde Molekül jemand bildet. Bessere Impfstoffe müssten also wahrscheinlich andere Bestandteile des Erregers enthalten. Es sieht so aus, als wären vielleicht bessere Impfresultate zu erzielen, wenn dem Impfserum zusätzlich zum schützenden Antigen Komponenten der Sporen zugefügt würden.

Man weiß heute viel über *Bacillus anthracis* – aber noch nicht genug, um ihn endgültig zu besiegen. Bei Darm-Milzbrand sterben trotz Behandlung immer noch durchschnittlich die Hälfte aller Betroffenen, bei Lungen-Milzbrand sind es gar über achtzig Prozent. Indessen gelang es, das Genom eines Stammes des Bazillus vollständig zu sequenzieren. Damit blicken wir dem mörderischen Bakterium nicht mehr nur ins Gesicht – sondern können in sein Innerstes schauen. ■

Michèle Mock *leitet die Abteilung für Toxine und bakterielle Pathogenität am Institut Pasteur in Paris.*

Literaturhinweise

Anthrax. Von Michèle Mock und Angès Fouet in: Annual Review of Microbiology, Bd. 55, S. 647, 2001.

Crystal structure of the anthrax lethal factor. Von Andrew D. Pannifer et al. in: Nature, Bd. 414, S. 229, 2001.

Identification of the cellular receptor for anthrax toxin. Von Kenneth A. Bradley et al. in: Nature, Bd. 414, S. 225, 2001.

Designing a polyvalent inhibitor of anthrax toxin. Von Michael Mourez et al. in: Nature Biotechnology, Bd. 19, Heft 10, S. 958, Okt. 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Haarausfall an der Wurzel

Gute Neuigkeiten für Glatzenträger und alle, die es gar nicht erst werden wollen: Wissenschaftler entschlüsseln mit großem Erfolg die Prozesse, die das Haarwachstum steuern – und hoffen, so schon bald das Instrumentarium in der Hand zu halten, um Haarausfall und übermäßigen Haarwuchs wirksam bekämpfen zu können.

Von Ricki L. Rusting

Mit fünfzig Jahren hat schon etwa die Hälfte aller Männer und Frauen Erfahrung mit einem unliebsamen Problem gemacht: Haarausfall. Das „starke" Geschlecht leidet normalerweise unter einem zurückweichenden Haaransatz über der Stirn („Geheimratsecken") und einer kahl werdenden Stelle oben auf dem Hinterkopf („Tonsur"). Bei Frauen lichtet sich das Haar dagegen auf eher diffuse Weise. Außerdem ärgern sich viele ältere Menschen darüber, dass plötzlich an unverwünschten Stellen Haare sprießen – etwa in Nasenlöchern und Ohren.

Gegen diese Probleme gibt es zwar die verschiedensten Mittel, aber deren Wirksamkeit ist begrenzt bis fraglich. Dabei sollte es eigentlich nicht schwer sein, Abhilfe zu schaffen. Pharmakologen müssten nur Medikamente entwickeln, die gezielt jene körpereigenen Moleküle beeinflussen, die das Haarwachstum normalerweise steuern. Bisher scheiterte diese Strategie aber schlicht daran, dass man die betreffenden Regulatormoleküle überhaupt nicht kannte oder kaum etwas über sie wusste.

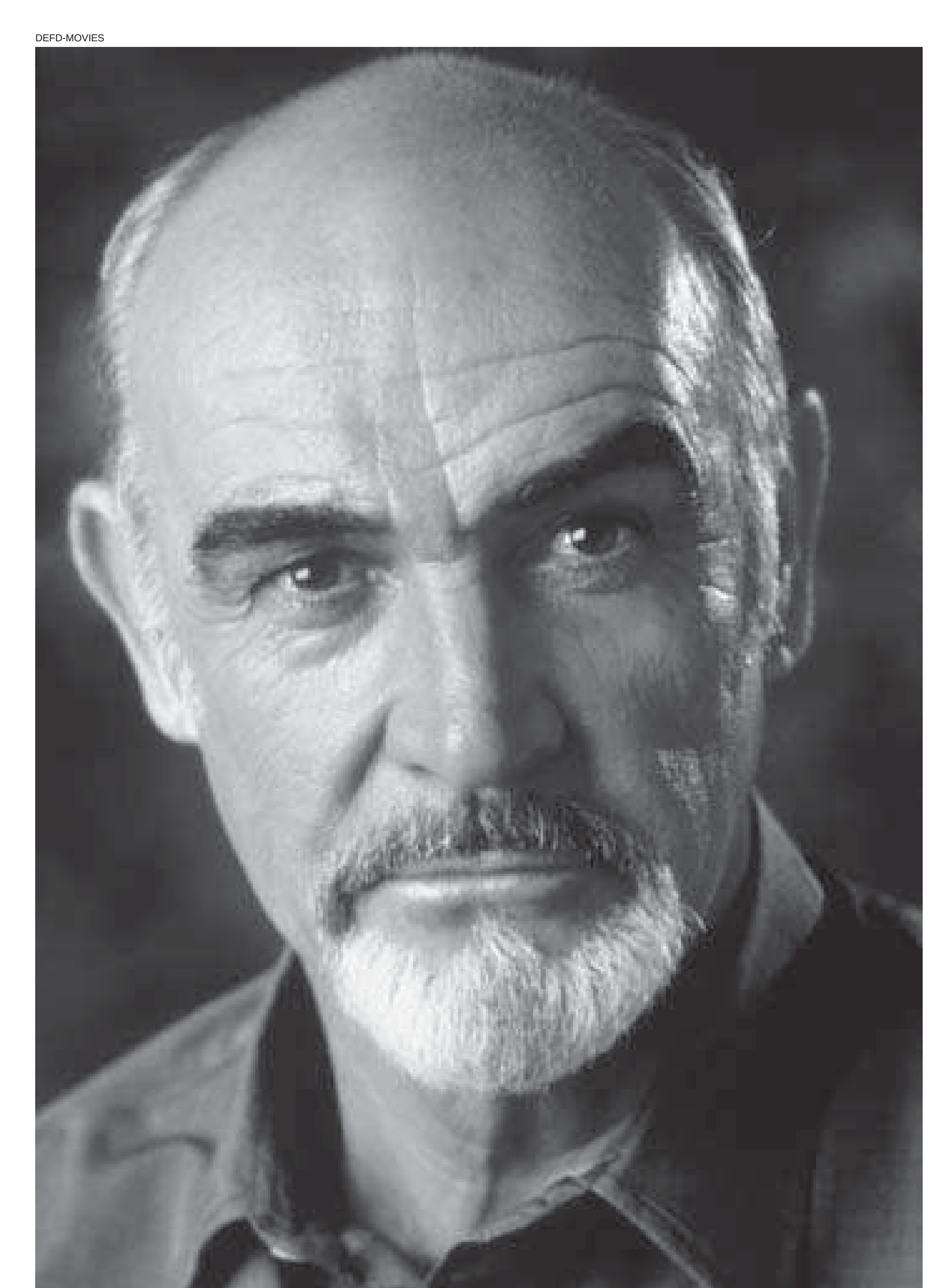
Noch vor fünf Jahren war der Erkenntnisstand auf diesem Gebiet äußerst dürftig. Doch inzwischen haben mehrere Forschergruppen erste Erfolge bei der Suche nach den molekularen Kontrollinstanzen des Haarwachstums errungen. Die Erkenntnisfortschritte wecken Hoffnung, in absehbarer Zeit das komplette Bild der Steuerungsmechanismen aufdecken zu können. Dann sollte sich mühelos feststellen lassen, welches Regulator-

DEFD-MOVIES



Wurzel packen

DEFD-MOVIES



molekül bei einer bestimmten Haarwachstumsstörung versagt hat und wie der Defekt am besten zu beheben ist.

Aber auch Menschen mit schweren Erkrankungen, die gar nichts mit den Haaren zu tun haben, könnten von diesen Forschungen profitieren. Im vergangenen Jahr haben Wissenschaftler in der Haut das Versteck der noch unspezialisierten Stammzellen aufgespürt, die Verluste bei den Haare produzierenden Zellen ersetzen und ständig die Epidermis, also die oberste Hautschicht, verjüngen. Wenn sich diese noch formbaren Zellen in andere Gewebe – besonders in Nerven und Muskeln – umwandeln ließen, böten sie eine neuartige Möglichkeit, weit verbreitete Krankheiten wie Herzinfarkt, Alzheimer oder Parkinson zu behandeln. Dabei würden die ethischen Konflikte vermieden, die mit der Gewinnung von Stammzellen aus Embryonen verbunden sind.

Wie ein Haar entsteht

Bevor Wissenschaftler allerdings die molekularen Steuerungsmechanismen eines Vorgangs aufklären können, müssen sie zunächst einmal dessen grundlegenden Ablauf kennen. Tatsächlich ist es bis Mitte der 1990er Jahre gelungen, unter dem Mikroskop all die vielen Teilschritte zu identifizieren, die im sich entwickelnden Embryo zur Ausbildung eines Haarfollikels oder -balgs führen, also jenes vasenähnlichen Gebildes in der Haut, aus dem ein Haar sprießt. Inzwischen kennen sie auch den Haarzyklus – die periodische ▶

Teilt das Los vieler Männer: Sean Connery im Alter von 28 (links) und 65 Jahren

Abfolge von Phasen, in denen Follikel Haare bilden oder vorübergehend ruhen. Er wird während des Lebens immer wieder durchlaufen.

Haarfollikel entstehen bereits im jungen Embryo. Dabei erhält zunächst jeweils ein kleiner Bereich in der obersten Zell-Lage, dem so genannten Ektoderm, von dem darunter liegenden Mesoderm das Signal, eine Einstülpung zu bilden. Das Ergebnis ist eine längliche Struktur, die als Haarkeim bezeichnet wird.

Diese weist nun die darunter liegenden Mesodermzellen an, sich zusammenzuballen und die so genannte Papille zu bilden, die zu einer Art Kommandozentrale wird: Sie veranlasst die embryonalen Zellen, sich durch weitere Teilung schließlich zu einem voll ausgereiften Haarfollikel zu entwickeln. Dabei erhält der obere, bleibende Abschnitt eine Talgdrüse, die ein fettiges Sekret absondert. Außerdem entsteht ein Wulst, von dem man heute weiß, dass er die meisten oder gar alle Stammzellen beherbergt, die während des ganzen Lebens Nachschub für das Haar, die Talgdrüse und die Epidermis (Oberhaut) liefern.

Der Abschnitt unterhalb des Wulstes, die so genannte Haarzwiebel, wird zur Haar produzierenden Region. Sie bildet sich aus Zellen, die vom Haarkeim wie eine wachsende Wurzel nach unten vordringen. Tief im Inneren der Lederhaut bilden sie dann eine zwiebelförmige Matrix, die sich um die Haarpapille wölbt und von ihr zur Teilung angeregt wird. Die sich vermehrenden Matrixzellen werden aufwärts geschoben und verlieren so den Kontakt zur Papille. Als Folge davon hören sie auf sich zu teilen und erlangen durch „terminale Differenzierung" ihre endgültige Struktur und Funktionsfähigkeit.


JEFF MERMELSTEIN

Haar ist geduldig. Die abgestorbenen, keratinhaltigen Zellen, aus denen es besteht, sind äußerst reißfest und extrem strapazierfähig.

Ein Leben in Zyklen

Die direkt über der Spitze der Papille liegenden Matrixzellen reifen dabei zu Haarzellen heran: Sie produzieren die fadenförmigen Keratinmoleküle, die für das Haar charakteristisch sind. Weiter außen gelegene Matrixzellen entwickeln sich dagegen zur inneren Wurzelscheide, die den eigentlichen Haarschaft umhüllt. Sie wird ihrerseits von einer äußeren Wurzelscheide umschlossen. Neu gebildete Zellen schieben die älteren immer weiter aufwärts, sodass diese schließlich durch die Hautoberfläche brechen. Dabei sterben sie ab und bilden einen Schaft aus toten, keratinreichen Zellen, die mechanisch und chemisch sehr beständig sind. Sie schmücken als Haar unsere Kopfhaut und bedecken in spärlicherer Form unseren ganzen Körper.

Der Säugling kommt schließlich mit fünf bis sechs Millionen Haarfollikeln zur Welt; neue bilden sich danach nicht mehr. Das Verteilungsmuster der Follikel ist genetisch festgelegt. Die Handflächen und Fußsohlen sind so ziemlich die einzigen Areale, die wirklich keine Haarfollikel enthalten. Andere unbehaart erscheinende Hautzonen tragen kurze, dünne Haare.

Innerhalb von zwei bis drei Jahren nach der Geburt beginnen die Haarfollikel mit ihren lebenslangen Zyklen. Man unterscheidet dabei im Wesentlichen drei Phasen. Im so genannten Katagen begehen die Zellen der Haarzwiebel gleichsam Selbstmord. Zurück bleiben nur die Papille und eine Membran (die Basalmembran) um die nun absterbende Region. Die Membran kontrahiert sich und zieht dabei die Haarpapille bis hinauf zum Wulst unter der Talgdrüse. In der Kopfhaut dauert das etwa zwei Wochen. In dieser Zeit verliert der Haarschaft seine Verankerung tief in der Haut und fällt daher leicht aus.

Wenn die Haarpapille den Wulst erreicht hat, tritt der Follikel in eine Ruhephase ein. Dieses so genannte Telogen dauert in der menschlichen Kopfhaut etwa drei Monate, aber die genaue Zeitspanne wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst. Durch Auszupfen der wurzellosen Haare oder Verletzen der Haarfollikel kann sich die Ruhephase beispielsweise verkürzen.

Schließlich folgt eine neuerliche Wachstumsphase, das Anagen. Zunächst teilen sich Stammzellen im Wulst. Sie wandern an der Basalmembran entlang und entwickeln sich dabei zu Zellen der Matrix oder der äußeren Wurzelscheide. Die Matrixzellen beginnen sich dann wieder zu teilen und bringen so schließlich neue Haarzellen und eine innere Wurzelscheide hervor. Praktisch wiederholen sich dabei die Teilschritte der Haarbildung während der Embryonalentwicklung. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Vorgänge in der Wachstumsphase auch teilweise durch dieselben Signalmoleküle gesteuert werden.

STECKBRIEF

➤ Biologen verstehen inzwischen die grundlegenden Schritte bei der Entwicklung von Haarfollikeln in Embryonen und beim zyklischen Haarwachstum im späteren Leben. Eine wichtige Rolle spielen in beiden Fällen Signalgeber aus einer Wnt genannten Proteinfamilie in Verbindung mit weiteren regulatorischen Molekülen.

➤ Bei Kahlköpfigkeit sterben die Haarfollikel gewöhnlich nicht ab, sondern verkümmern nur und werden inaktiv. Mit Wirkstoffen zur Manipulation der Wnt-Proteine oder anderer Regulatoren sollte sich dies beheben lassen. Einsichten in die Steuerungsmechanismen des Haarwachstums dürften auch neue Strategien gegen unerwünschten Haarwuchs eröffnen.

Im Anagen bilden die wiederhergestellten Follikel in der Kopfhaut etwa einen Zentimeter Haar pro Monat. Sie können dabei sechs bis acht Jahre aktiv bleiben. Die Dauer der Wachstumsphase bestimmt, wie lang ein einzelnes Haar werden kann. An jedem Tag im Leben einer durchschnittlichen 20-jährigen Person befinden sich 90 Prozent der Haarfollikel in der Kopfhaut in der aktiven, Haar produzierenden Phase. Etwa 10 Prozent sind inaktiv oder im Katagen. Ungefähr 50 bis 100 Haare fallen aus.

Haarausfall beruht normalerweise nicht darauf, dass Haarfollikel verschwinden. Vielmehr verschiebt sich das Verhältnis zwischen solchen im aktiven und inaktiven Zustand. Zudem schrumpfen viele Follikel immer mehr, bis sie schließlich nur noch kurze, farblose Haare produzieren.

Die Hand am Steuer

Während der Wachstumsphase weist die Papille die Matrixzellen an, sich zu teilen und in Haarzellen zu verwandeln. Wie macht sie das? Noch ist die Antwort nicht genau bekannt. Aber in den letzten Jahren haben Elaine Fuchs und ihre Kollegen an der Universität Chicago herausgefunden, dass die Papille bestimmte Signalmoleküle aktiviert. Hierbei handelt es sich um Proteine aus der so genannten Wnt-Familie. Sie sind schon lange als Schlüsselregulatoren für eine Reihe von Entwicklungsvorgängen in Säugetieren und anderen Organismen bekannt.

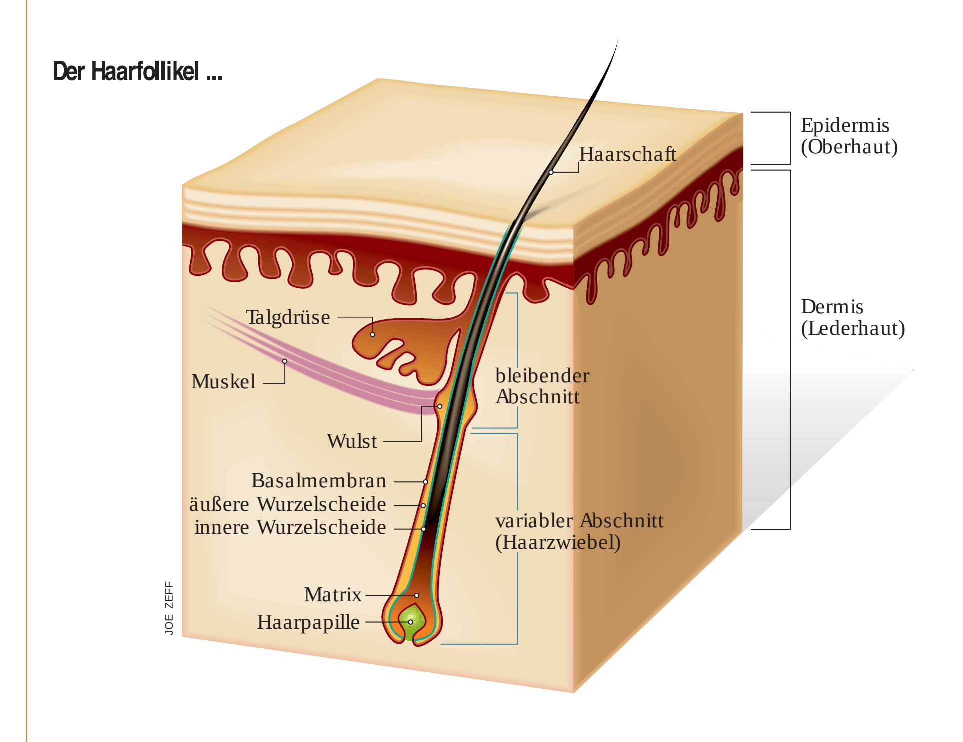
Vor etwa sechs Jahren entdeckte Fuchs zufällig die ersten Hinweise darauf, dass Wnt-Proteine auch für das Haarwachstum von Bedeutung sind. Damals wollte sie herausfinden, welche Signalmoleküle bestimmte Matrixzellen dazu anregen, Keratine zu bilden – aus Gründen, die mit der Behandlung menschlicher Haarwachstumsstörungen nichts zu tun hatten.

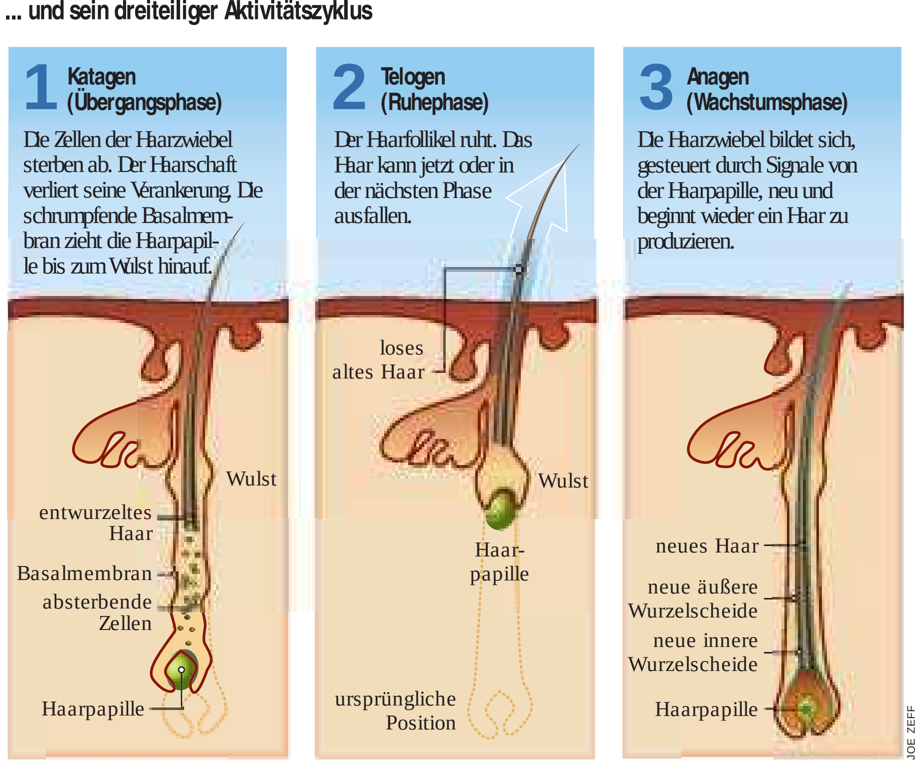
Oft beginnt eine Zelle sich zu verändern, nachdem sich ein Signalmolekül von außen an einen Rezeptor auf ihrer Oberfläche angelagert hat. Dieses Andocken löst dann eine Kaskade molekularer Interaktionen im Zellinneren aus. Als Folge davon werden bestimmte Gene im Zellkern aktiviert und schließlich die zugehörigen Proteine hergestellt. Weil Fuchs dies wusste, versuchte sie zunächst die Moleküle im Zellkern zu identifizieren, welche die Keratin-Gene anschalten. Diese sollten sie dann zu den Signalstoffen führen, die die Umwandlung von Matrix- in Haarzellen steuern.

Auf diese Weise entdeckte die Arbeitsgruppe von Fuchs, dass ein regu- ▶

Die haarigen Einzelheiten

Der reife Haarfollikel besteht aus einer vasenförmigen, unten zwiebelartig verdickten Struktur, die den Haarschaft hervorbringt. Im Laufe des Lebens wechseln die Follikel immer wieder zwischen Wachstums- und Ruhephasen. Viele der Moleküle, die diesen Aktivitätszyklus steuern, sind inzwischen identifiziert worden. Das eröffnet neue Strategien zur Bekämpfung von Störungen des Haarwachstums.





latorisches Protein mit der Bezeichnung LEF1 (nach englisch *lymphocyte enhancer factor*, Lymphozyten anregender Faktor) zur Aktivierung der Keratin-Gene für das Haar beitrug. Wie sich zeigte, ist LEF1 auch während der Bildung von Haarfollikeln im Embryo vorhanden: Es erscheint schon in den frühen Anhäufungen von Ektodermzellen, die den Haarkeim bilden. In den Zellen, aus denen die Haarpapille wird, ließ es sich ebenfalls nachweisen. Vermutlich wird LEF1 durch ein von außen kommendes Signal aktiviert und hilft dann seinerseits Gene anzuschalten, die für die Follikelbildung und das Haarwachstum benötigt werden. In Übereinstimmung mit dieser Annahme entdeckten Rudolf Grosschedl und

Wenn Haarausfall ans Herz geht

Schimmernde Glatzen können ein erhöhtes Herzinfarkt-Risiko anzeigen

Mehrere Untersuchungen aus den letzten zehn Jahren haben Hinweise darauf erbracht, dass Kahlköpfigkeit mehr als nur ein Schönheitsproblem ist: Möglicherweise zeigt sie zugleich ein erhöhtes Risiko für Herzkrankheiten an. Auch die größte solche Studie bisher, durchgeführt unter Leitung von JoAnn E. Manson vom Brigham and Women's Hospital der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts), kam vor zwei Jahren zu diesem Ergebnis.

Sie war ein Nebenprodukt der Physicians' Health Study, einer Langzeituntersuchung an rund 22 000 männlichen Ärzten zum Risiko einer Herzerkrankung. Elf Jahre nach Beginn des Projekts, als die Teilnehmer zwischen 51 und 95 Jahren alt waren, sollten sie angeben, welches von fünf Bildern ihrer Haarverteilung im Alter von 45 Jahren am besten entsprach. Die meisten künftigen Glatzköpfe verlieren ihren Kopfschmuck in einer typischen Abfolge, wenn auch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (Bild). Zunächst weicht der Haaransatz an den Schläfen zurück. Dann beginnt auch in einer kreisförmigen Region oben am Hinterkopf das Haar auszufallen. Schließlich vereinigen sich die nach hinten vordringende Stirnglatze und die wachsende kahle Stelle im Tonsurbereich.

Manson und ihre Kollegen untersuchten die Beziehung zwischen dem Haarwuchsmuster und Herzerkrankungen bei den 19 112 Teilnehmern der Studie, die anfangs noch keine Probleme mit dem Herzen gehabt hatten. Da verstorbene Ärzte nicht erfasst wurden, ließ sich die Verbindung zwischen Kahlköpfigkeit und tödlich verlaufendem Herzinfarkt nicht ermitteln. Bestimmt werden konnte dagegen der Zusammenhang zwischen Haarausfall und allen anderen „koronaren Ereignissen" – darunter insbesondere nicht tödlich verlaufende Herzinfarkte, Angina Pectoris und chirurgische Eingriffe am Herzen (wie Bypass oder Angioplastie).

Nachdem störende Einflüsse wie gesundheitsschädliche Verhaltensweisen berücksichtigt worden waren, zeigten sich deutliche altersunabhängige Korrelationen. Danach besteht für Männer mit Geheimratsecken gegenüber solchen mit vollem Haarwuchs nur ein um 9 Prozent höheres Risiko einer Herzerkrankung. Schon bei leichten Auslichtungen am Hinterkopf steigt das Erkrankungsrisiko jedoch um 23 Prozent und bei mäßig bis stark ausgebildeter „Tonsur" um mehr als 30 Prozent.

Am schlechtesten war es um völlig kahlköpfige Männer mit zusätzlichen Risikofaktoren bestellt. Wer von ihnen einen erhöhten Cholesterinspiegel hatte, erlitt im Durchschnitt fast dreimal so oft eine Herzerkrankung wie Männer mit hohem Cholesterinspiegel und vollem Haarwuchs. Bei hohem Blutdruck hatten Glatzenträger ein fast doppelt so hohes Risiko wie Männer ohne Haarausfall.

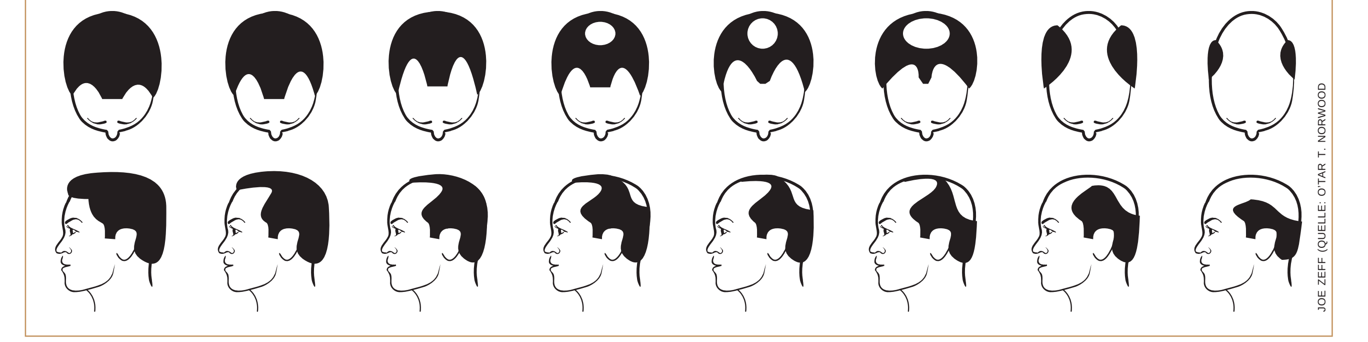
Noch lässt sich nur spekulieren, warum kahlköpfige Männer anfälliger für Herzerkrankungen sind. Der gemeinsame Nenner könnte in einer vermehrten Produktion von männlichen Sexualhormonen (Androgenen) oder einer höheren Empfindlichkeit ihnen gegenüber liegen. Immerhin sei erwiesen, so Manson, dass Androgene sowohl eine Rolle beim erblichen Haarausfall spielen als auch zu Atherosklerose („Arterienverkalkung") sowie zu einer stärkeren Blutgerinnungsneigung beitragen – beides Faktoren, die Herzerkrankungen Vorschub leisten.

Natürlich löst nicht die Kahlköpfigkeit selbst vermehrt Herzinfarkte aus. Sie kann aber als tägliche Mahnung dienen, die inzwischen wohlbekannten Regeln einer gesunden Lebensführung einzuhalten: nicht rauchen, regelmäßig Sport treiben, fettige Nahrung meiden und darauf achten, dass Blutdruck sowie Cholesterinspiegel im normalen Bereich bleiben.

Schützen Haarwuchsmittel auch vor Herzinfarkt? Diese nahe liegende Frage prasselte letztes Jahr in einer Flut von E-Mails auf Manson nieder. Leider gibt es, so ihre Standardauskunft, bisher keinerlei Hinweis, dass dem so ist.

Ricki L. Rusting

Als Bewertungsmaßstab für den Verlauf des erblichen Haarausfalls bei Männern dient die so genannte Norwood-Hamilton-Skala mit den hier abgebildeten Köpfen. Bei einem weniger typischen Verlauf (nicht gezeigt) weicht der Haaransatz einfach immer weiter bis zum Hinterkopf zurück, ohne dass sich ein kahler Fleck in der Tonsurregion entwickelt. In der oben beschriebenen Studie wurde eine vereinfachte Version der Skala eingesetzt.



JOE ZEFF (QUELLE: O'TAR T. NORWOOD

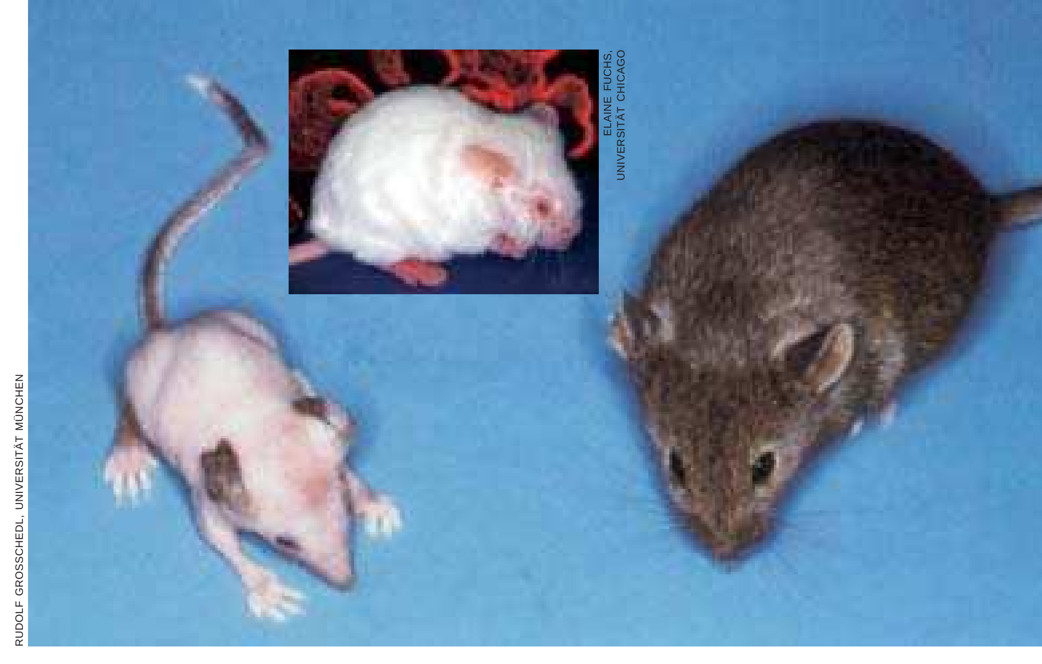
seine Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in San Francisco vor fünf Jahren (heute ist Grosschedl an der Universität München), dass Mäusen ohne LEF1 kein Pelz wächst. Und als Fuchs' Team durch Genmanipulation Nager erzeugte, die in ihrer Haut übermäßig viel LEF1 bildeten, wiesen sie mehr Haarfollikel als gewöhnlich auf.

Fast gleichzeitig zeigten andere Arbeitsgruppen, dass LEF1 nicht selbstständig Gene aktivieren kann, sondern sich zu diesem Zweck mit einem zweiten Protein namens β-Catenin verbinden muss. Damals war nur ein einziger Mechanismus bekannt, der diese Paarung bewirken kann: eine Signalkaskade, die ausgelöst wird, wenn sich ein Wnt-Molekül an die Zelloberfläche heftet. Normalerweise ist β-Catenin an der Ausbildung von Kontakten zu benachbarten Zellen beteiligt. Ohne Wnt-Signal markiert ein Enzym im Zellinneren jedes ungenutzte β-Catenin als zu vernichtenden Abfall. In Gegenwart von Wnts wird dieses Enzym dagegen an die Kette gelegt. Dann können sich β-Catenin-Moleküle in der Zelle anhäufen und sich an LEF1 oder verwandte Moleküle koppeln.

Auf dem Weg zu einer Therapie

In Kombination mit Fuchs' Entdeckungen legten diese Ergebnisse nahe, dass Wnt und β-Catenin sowohl für die Follikelbildung als auch für das Haarwachstum eine zentrale Rolle spielen. Weitere Untersuchungen seither stützen diese These. So entwickelte Fuchs' Arbeitsgruppe ein Verfahren zum Markieren derjenigen Zellen eines sich entwickelnden Embryos, die als Reaktion auf ein Wnt-Signal Gene anschalten, deren Proteinprodukte sich an LEF1 binden. Experimente mit diesem Verfahren deuten darauf hin, dass es Wnt-Proteine sind, mit denen das Mesoderm das darüber liegende Ektoderm zur Bildung einer Einbuchtung veranlasst. Und die Anweisung des Ektoderms an das Mesoderm, eine Haarpapille hervorzubringen, erfolgt anscheinend gleichfalls über ein Wnt-Signal. Außerdem ist Wnt wohl auch der Botenstoff, der nach Abschluss der Haarfollikelbildung die Matrixzellen über der Papille anweist, sich in Haarzellen zu differenzieren.

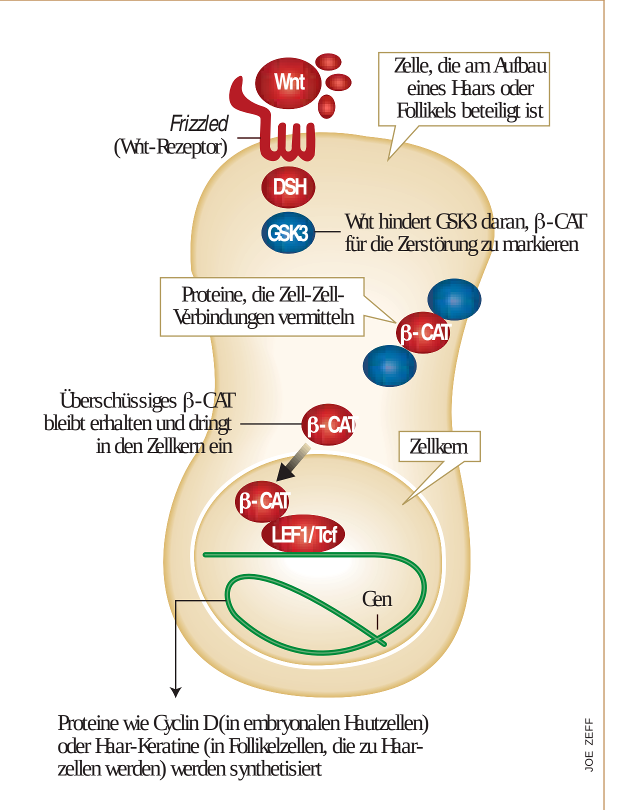
Die zentrale Bedeutung von Wnt wurde auf noch dramatischere Weise deutlich, als Fuchs' Arbeitsgruppe Mäuse schuf, die nach ihrer Geburt kein β-Catenin mehr in ihren Oberhautzellen abbauen konnten. Das hatte auf die Epidermis denselben Effekt, als empfinge sie ständig ein Wnt-Signal. Als aus- ▶



Ein regulatorisches Protein namens LEF1 trägt zur Aktivierung der Keratin-Gene für das Haar bei. Wird seine Bildung unterdrückt, entstehen „nackte" Mäuse ohne Fell und Barthaare (links). Um seine Wirkung zu entfalten, dockt LEF1 an β-Catenin an. Wenn dessen Abbau gehemmt wird, entwickeln die Nager einen besonders dichten, üppigen Pelz (Mitte oben).

Moleküle steuern das Haarwachstum

Jüngsten Untersuchungen zufolge spielen so genannte Wnt-Proteine eine wesentliche Rolle bei der Entstehung von Haarfollikeln in der Haut des Embryos. Auch später regen sie die Follikelzellen zur Haarbildung an. Wnts veranlassen ihre Zielzellen, den Abbau von β-Catenin (β-CAT) zu stoppen. Dieses Protein verbindet sich daraufhin mit LEF1 oder einem verwandten Eiweißstoff und trägt so zum Anschalten bestimmter Gene bei. Diese lassen dann Proteine entstehen, die bewirken, dass die Zellen sich spezialisieren und zum Aufbau des Follikels oder des Haars beitragen. Moleküle, die ein Teil des Wnt-Signalweges sind oder mit ihm interagieren, könnten eines Tages Angriffspunkte für Medikamente abgeben, die das Haarwachstum fördern oder hemmen.



Proteine, die mit dem Wnt-Signalweg in Hautzellen interagieren könnten:

Bone morphogenic protein (Knochenwachstumsfaktor)
Fibroblast growth factor (Fibroblasten-Wachstumsfaktor)
Noggin
Sonic hedgehog
Sox
Transforming growth factor beta (Transformierender Wachstumsfaktor beta)
Winged-helix nude

gewachsene Tiere entwickelten diese Nager einen besonders üppigen Pelz, da sie auch nach der Embryonalentwicklung immer neue Haarfollikel zwischen den bereits vorhandenen bildeten.

Diese nachträgliche Anlage von Follikeln ist sicher eine aufregende Entdeckung. Leser mit Haarausfall sollten es sich dennoch zweimal überlegen, bevor sie von Fuchs ein Reagenzglas voller Wnt erbitten, um es sich auf den Kopf zu schütten. Einige der Untersuchungsergebnisse mahnen nämlich zur Vorsicht: Als die pelzigen Nager älter wurden, entwickelten sie Knötchen, die zwar gutartig waren, aber einem verbreiteten menschlichen Tumor der Kopfhaut, dem Pilomatrikom, ähnelten. Das Team von Fuchs konnte anschließend zeigen, dass dieser Tumor beim Menschen entsteht, wenn eine Mutation im Gen für das β-Catenin dessen Abbau verhindert. Wnt und überschüssiges β-Catenin sind auch mit Tumoren des Dickdarms, der Leber, der Brust und der Fortpflanzungsorgane in Zusammenhang gebracht worden.

Dennoch bieten all diese Ergebnisse brauchbare Ansätze für die Behandlung von Haarwachstumsstörungen. Sie zeigen, dass Wnts die wichtigsten Regulatoren für die Follikelentwicklung und für den Wachstumszyklus eines Haares sind. Aber einfach kontinuierlich Wnts gegen Haarausfall zu verabreichen, wäre wegen des Krebsrisikos nicht empfehlenswert. Stattdessen muss man wohl raffiniertere

Kampf dem Kahlkopf

Pharmaunternehmen suchen nach der nächsten Generation von Haarwuchsmitteln

Von Ma Schmiedeskamp

Nur wenige Menschen akzeptieren Haarausfall mit Gleichmut. „Die Leute sagen mir oft, dass sie mit dem Verlust einer Niere leben könnten …, aber nicht mit dem Verlust ihrer Haare“, berichtet Vera H. Price, Direktorin des Zentrums für Haarforschung an der Universität von Kalifornien in San Francisco. Wie kann die Wissenschaft ihnen helfen?

Eine tröstliche Nachricht aus der Biologie ist, dass bei den häufigsten Typen des Haarausfalls die Haarfollikel nicht absterben. Bei der erblichen Form (androgenetischer Alopezie) zum Beispiel, die sich bei Männern und Frauen unterschiedlich manifestiert, verkümmern die Haarfollikel, und ihr Aktivitätszyklus verkürzt sich. Dann entstehen nur noch extrem dünne, kurze Haare. „Sogar kahlköpfige Menschen haben kleine Haare auf dem Kopf“, erklärt Bruce A. Morgan vom Cutaneous Biology Research Center der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). Bei einer selteneren Funktionsstörung, dem kreisrunden Haarausfall (Alopecia areata), der fast zwei Prozent der Bevölkerung betrifft, endet die Wachstumsphase der Haarfollikel durch eine Autoimmunreaktion vorzeitig. Dann fallen in einigen Regionen oder im Extremfall am ganzen Körper die Haare aus. Aber auch hier überleben die Follikel.

Die Behandlung des kreisrunden Haarausfalls zielt normalerweise darauf ab, das entgleiste Immunsystem wieder in rechte Bahnen zu lenken. Anders bei der erblichen Form: Hier geht es darum, die verkümmerten Follikel zu vergrößern und die Haarlänge zu steigern. Minoxidil war die erste Substanz, welche die FDA (Food and Drug Administration, die US-Arzneimittelbehörde) für diesen Zweck zugelassen hat. Ursprünglich als Blutdruck senkendes Mittel entwickelt, wurde der Wirkstoff 1988 in den USA eingeführt und ist unter dem Namen Regaine inzwischen auch in Deutschland erhältlich. Es handelt sich um das einzige klinisch getestete Haarwuchsmittel, das von Männern und Frauen angewendet werden kann. Wissenschaftler streiten noch darüber, wie Minoxidil die Produktion von längerem und dickerem Haar anregt: Vielleicht steigert es die Durchblutung der Kopfhaut, sodass die Haarfollikel besser ernährt werden; vielleicht verändert es aber auch die Konzentration intrazellulärer Substanzen, die das Haarwachstum steuern.

JEFF MERMELSTEIN

Der Wirkmechanismus der zweiten zugelassenen Substanz, Finasterid, ist offenkundiger. Diese Verbindung, die als Propecia gegen Haarausfall bei Männern (und als Proscar in höherer Dosis gegen gutartige Vergrößerungen der Prostata) auf den Markt kommt, wird oral eingenommen. Im Körper hemmt sie ein Enzym, das Testosteron in Dihydrotestosteron (DHT) umwandelt. Letztlich bremst es also die Bildung von DHT. Dieses Sexualhormon ist für die normale Entwicklung männlicher Föten notwendig, kann aber später viel Ärger bereiten: Es regt einige Haarfollikel zur Bildung langer, dicker Haare an (auf Wangen und Kinn zum Beispiel); außerdem lässt es bei anfälligen Männern das Haupthaar dünner werden, manchmal schon vor Erreichen des 14. Lebensjahrs. Einige Forscher vermuten, dass DHT die Funktion der Haarfollikel beeinträchtigt. Durch Wechselwirkung mit der Haarpapille könnte es die Produktion von Substanzen stören, die das Haarwachstum fördern.

Interessant ist das Ergebnis einer 1998 veröffentlichten Studie an mehr als 1200 Männern im Alter zwischen 18 und 41 Jahren, die alle unter leichtem bis mittelschwerem Haarausfall litten. Etwa 83 Prozent von ihnen konnten sich mit Hilfe von Finasterid ihren Haarwuchs über zwei Jahre hinweg zumindest erhalten. Bei mehr als der Hälfte wuchs sogar etwas Haar nach. Aber Jerry Shapiro, Direktor am Hair Reasearch and Treatment Center der Universität von British Columbia in Vancouver warnt: „Es ist wichtig, die Erwartungen der Patienten zu dämpfen. Sie müssen wissen, dass sie keinen üppigen Haarwuchs bekommen werden. Primär geht es um die Verhütung von weiterem Haarausfall. Ein Nachwachsen von Haaren ist zwar möglich, aber dies sollte nicht herausgestellt werden, besonders nicht bei Männern mit weiter fortgeschrittenem Haarausfall.“

Mit fünfprozentiger Minoxidil-Lösung können Männer ähnliche Effekte wie mit Finasterid erzielen, erklärt Marty E. Sawaya von der Firma Aratec, die für verschiedene Unternehmen klinische Tests durchführt. Sie schätzt, dass 25 bis 30 Prozent der Betroffenen mit beiden Wirkstoffen mäßiges bis dichtes Haarwachstum zurückerlangen. Einige Männer versuchen auf Nummer Sicher zu gehen, indem sie sowohl Minoxidil (in den USA frei verkäuflich, in Deutschland dagegen verschreibungspflichtig) als auch das verschreibungspflichtige Finasterid anwenden. Zumindest bei Bärenmakaken wirken beide Stoffe zusammen besser als einer allein.

Strategien verfolgen. So könnte man versuchen, die Dosis in einem zeitlichen Muster zu variieren, das dem natürlichen nahe kommt. Oder man greift anderswo in die Wnt-Signalkette ein.

Dazu brauchen die Wissenschaftler aber noch mehr Informationen über ▶



JEFF MERMELSTEIN

In der aktiven Phase seines Zyklus, die sechs bis acht Jahre dauert, bildet ein Haarfollikel auf dem Kopf pro Monat ungefähr einen Zentimeter Haar.

Shapiro und Price raten ihren Patienten, etwa ein Jahr zu warten, bevor sie entscheiden, ob ein Haarwuchsmittel wirkt – und sie schärfen jedem ein, die Medikamente regelmäßig und sachgemäß anzuwenden. Minoxidil wird zweimal täglich direkt auf die Kopfhaut aufgetragen. Propecia gibt es dagegen in Form einer Tablette, die einmal täglich einzunehmen ist. Um wirksam zu sein, muss jedes der beiden Mittel auf Dauer angewendet werden. „Nichts kann Haarausfall ganz und gar rückgängig machen“, sagt Price. „Aber verlangsamen oder stoppen lässt er sich mit diesen Präparaten.“

Gegen Haarausfall bei Frauen hilft eine zweiprozentige Minoxidil-Lösung. Damit gelingt es in rund 60 Prozent der Fälle, den Haarwuchs zu erhalten; manchmal wächst auch Haar nach. Für Frauen, die mit dem entgegengesetzten Übel, nämlich unerwünscht starkem Haarwuchs im Gesicht (speziell auf der Oberlippe), behaftet sind, gibt es jetzt auch ein von der FDA zugelassenes Mittel (in Deutschland wird die Zulassung demnächst erwartet): eine Creme mit dem Wirkstoff Eflornithin, die in den USA unter dem Namen Vaniqa verkauft wird. Sie hemmt ein Enzym, das für die Zellteilung notwendig ist und verzögert so das Haarwachstum. Aber auch hier sollten die Betroffenen ihre Erwartungen nicht zu hoch schrauben: Etwa 58 Prozent der Frauen stellen eine leichte bis deutliche Verbesserung fest, üblicherweise erst nach ein paar Monaten. Da die Creme das Haarwachstum aber nur verlangsamt und nicht zum Stillstand bringt, müssen unerwünschte Härchen trotzdem ausgezupft oder sonstwie entfernt werden.

Ein Großteil der Forschung von Pharmaunternehmen wird geheim gehalten, bis eine vielversprechende Substanz reif für klinische Tests ist. Trotzdem kann man davon ausgehen, dass auch die Haarwuchsmittel, die demnächst neu auf den Markt kommen werden, auf bekannten Prinzipien beruhen. Mehrere Unternehmen haben zum Beispiel Moleküle entwickelt, die dasselbe Enzym wie Finasterid hemmen. Bei der ehemaligen Höchst AG wurden bis 1997 Labortests mit einer Substanz durchgeführt, die DHT daran hindern soll, sich an die Zellen der Haarfollikel zu binden; sie würde direkt auf die Kopfhaut aufgetragen. Bei Bristol-Myers Squibb befindet sich ein Stoff in der Frühphase klinischer Studien, der ähnlich wie Minoxidil wirken soll.

Die Verbindung mit den besten Aussichten, demnächst am Menschen getestet zu werden, ist Dutasterid von GlaxoSmithKline. Wie Finasterid hemmt es das Enzym, das DHT herstellt. Dieses Enzym kommt allerdings in zwei unterschiedlichen Formen (Isoenzymen) vor, von denen Finasterid nur eines bremst. Dutasterid wirkt gegen beide. Nach Auskunft von Sawaya deuten die vorläufigen Ergebnisse darauf hin, dass es das Nachwachsen ausgefallener Haare wirksamer fördert als Finasterid – und das bei geringerer Dosis.

„Bisher gibt es noch kein Produkt, das mehr als die Hälfte der Anwender in helles Entzücken versetzt“, meint die Aratec-Forscherin. „Ich bin überzeugt, dass Dutasterid ein solches Produkt werden kann, wenn das Unternehmen seine Entwicklung weiter verfolgt.“ Aber ob und wann bei der FDA beantragt wird, das Mittel gegen Haarausfall zuzulassen, bleibt fraglich. Eine Zulassung zu erlangen ist zeitaufwendig und teuer, daher könnte GlaxoSmithKline die Substanz lieber erst einmal gegen Prostata-Beschwerden einführen, wie es auch bei Finasterid der Fall war.

Wissenschaftler sind immerzu auf der Suche nach neuen Wirkstoffen. Morgan's Kollege Michael Detmar entdeckte vor einem Jahr, dass ein Wachstumsfaktor, der die Blutzufuhr steigert, in hohen Dosen bei Mäusen das Fell schneller und kräftiger wachsen lässt. Nun sei, so Morgan, die Jagd auf kleine Moleküle eröffnet, die diesen Wachstumsfaktor entweder nachahmen oder aktivieren. Aber Medikamente auf dieser Basis liegen noch in weiter Ferne. Dasselbe gilt für Substanzen zur Beeinflussung von Molekülen wie Wnt oder β-Catenin, die das Haarwachstum unmittelbar steuern. Es bedarf noch intensiver Forschung, bis es gelingt, die eigentlichen Zielmoleküle so behutsam zu manipulieren, dass keine schwerwiegenden Nebenwirkungen wie Krebs drohen.

JEFF MERMELSTEIN

Ein grundlegendes Verständnis der Haar-Biologie könnte Wissenschaftler eines Tages in die Lage versetzen, ein defektes Gen in den Haarfollikeln mittels Gentherapie zu reparieren. Denkbar wäre auch, Haut mit Haaren in einer Glasschale zu züchten und dann auf einen Glatzkopf zu transplantieren. „Das Haarwachstum zu ergründen ist ähnlich kompliziert wie die Entwicklung von Gliedmaßen zu verstehen – es ist eine Riesenherausforderung“, meint Kurt S. Stenn, leitender Wissenschaftler bei der Firma Juvenir Biosciences, die sich kürzlich von Johnson & Johnson abgespalten hat, um sich ganz auf Haarforschung zu konzentrieren. „Aber wir entdecken eine Menge – und zwar sehr schnell. Dies ist eine aufregende Zeit für Haar-Biologen. Wir stehen kurz vor dem entscheidenden Durchbruch.“

__Mia Schmiedeskamp__ ist Wissenschaftsjournalistin in Seattle.

Wissenswertes über Haare

Von Julius Cäsar wird überliefert, dass er seine „spärlichen Locken“ nach vorn kämmte, um seine kahle Stirn zu bedecken; außerdem ließ er sich „überflüssiges Haar“ auszupfen.

Gerinnungshemmer, Antidepressiva, Tabletten gegen Bluthochdruck und anabole Steroide gehören zu den Medikamenten, die Haarausfall verursachen können.

Einige Frauen bekommen nach einer Geburt oder nach dem Absetzen der „Pille“ Haarausfall.

Haareschneiden macht das Haar weder dicker, noch beschleunigt es das Haarwachstum.

Wenn sich die winzigen Muskeln, die mit den Haarfollikeln verbunden sind, gleichzeitig zusammenziehen, bildet sich eine Gänsehaut: Die Haare stehen einem zu Berge.

Körperliche Belastungen wie schwere Infektionen oder chirurgische Eingriffe können Haarausfall verursachen – mit einer Zeitverzögerung von bis zu sechs Monaten.

Eine durchschnittliche Kopfhaut enthält etwa 100 000 Follikel.

Borsten sind die einzigen Haare von Walen, Elefanten und Nashörnern.

Die Glatze bei Männern kann sowohl väter- als auch mütterlicherseits vererbt werden; viele Gene scheinen daran beteiligt zu sein.

Zytostatika zur Krebsbehandlung verursachen Haarausfall, weil sie Zellen abtöten, die sich schnell teilen – darunter die sich rasch vermehrenden Haarzellen. Die Haare wachsen wieder nach, weil die Stammzellen, welche die verlorenen Haarzellen ersetzen, in aller Regel nicht beschädigt werden.

In Wasser kann ein Haar um bis zu einem Drittel seiner Länge gestreckt werden, ohne Schaden zu nehmen.

Normalerweise fallen täglich ungefähr fünfzig bis hundert Kopfhaare aus.

Bei Haartransplantationen werden Haarfollikel von den Schläfen und dem Hinterkopf eines Mannes auf die kahlen Stellen verpflanzt.

Im Laufe des Lebens kann ein durchschnittlicher Haarfollikel in der Kopfhaut mehr als zehn Meter Haar bilden.

Haare „spüren“ mechanische Verformungen und leiten die Information an das Nervensystem weiter.

Ein Augenbrauenhaar wächst etwa zwei Monate lang, bis es ausfällt.

Follikel mit rundem Querschnitt erzeugen glattes Haar, solche mit abgeflachtem Querschnitt dagegen Locken.

Das ständige Tragen von festen Haarbändern, Zöpfen oder einem Dutt kann bleibende kahle Stellen verursachen.

den Wnt-Signalweg und über Faktoren in der Haut, die ihn beeinflussen. Welche Wnts und welche ihrer zahllosen Rezeptoren sind an den einzelnen Schritten im Wachstumszyklus eines Haars und an der Bildung eines Follikels beteiligt? Wie wird die Produktion der Wnts selbst gesteuert? Und welche Moleküle innerhalb der Zielzellen legen deren Reaktion auf ein Wnt-Signal fest – entscheiden also beispielsweise darüber, ob eine Umwandlung in Haarzellen oder in andere Komponenten des Follikels stattfindet?

Die Untersuchung von Signalwegen, die mit der Wnt-Kaskade verschränkt sind, dürfte einige Antworten liefern. Bei der Erforschung einer Vielzahl von Geweben und Organismen sind Wissenschaftler inzwischen auf eine ganze Reihe von Proteinen aus solchen Signalwegen gestoßen. Sie tragen meist englische Namen, die historisch bedingt und deshalb teilweise nichtssagend sind. *Sonic hedgehog, transforming growth factor, bone morphogenic protein, noggin* und *fibroblast growth factor* sind nur einige von ihnen.

Sonic hedgehog könnte beim Haarwachstum eine entscheidende Rolle spielen. Genau wie die Wnt-Proteine übermittelt es eine Botschaft von einer Zelle zur anderen und ist für die normale Entwicklung des Embryos unentbehrlich. Außerdem kreuzt sich sein Signalweg in vielen Fällen mit dem von Wnt. Zwar scheint *sonic hedgehog* nicht für die Bildung eines Haarkeims benötigt zu werden, ist aber an dessen Entwicklung zum fertigen Follikel beteiligt. Außerdem kann es, wie Ronald G. Crystal vom Weill Medical College an der Cornell-Universität in Ithaca (New York) vor zwei Jahren herausfand, ruhende Haarfollikel zu neuem Wachstum anregen: Induziert man seine Produktion in Follikeln erwachsener Mäuse während der Ruhe-Phase, gehen sie vorzeitig wieder in die aktive Anagen-Phase über.

Eine wirksame Haartinktur in fünf Jahren?

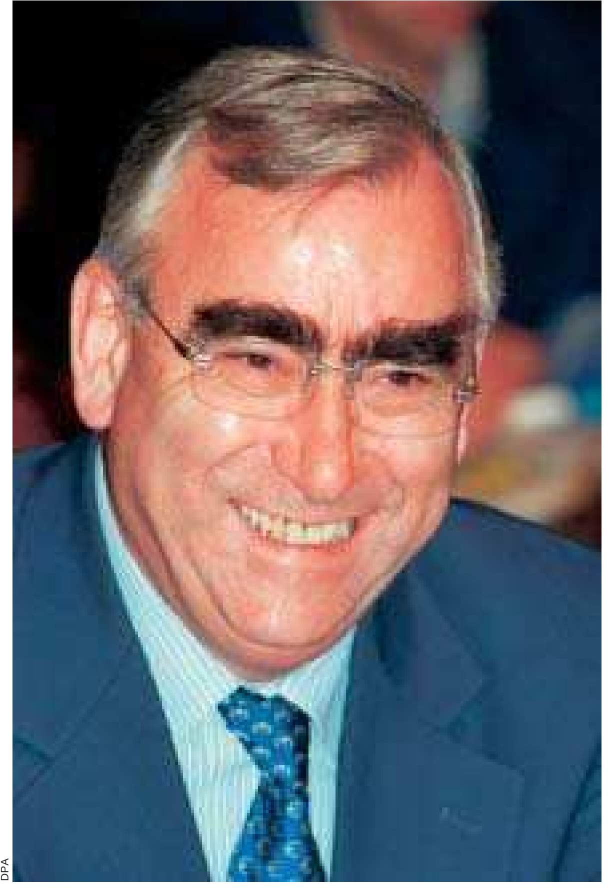
Die Behandlung mit *sonic hedgehog* scheint also ein interessanter Ansatz zur Stimulierung des Haarwachstums zu sein. Aber auch hier besteht Krebsgefahr: Ein zu starkes Signal kann Basalzellen der Haut wuchern lassen. Vor dem Einsatz von *sonic hedgehog*, Wnts oder anderen Wachstumsfaktoren zum Erhalt oder zur Rückbildung einer üppigen Haarpracht müssen die Pharmakologen also erst sichere Dosierungsschemata entwickeln.

Zu klären, inwiefern Knochen-Wachstumsfaktoren (*bone morphogenic proteins*) und verschiedene Formen des transformierenden Wachstumsfaktors β (*transforming growth factor β*) die Wnt-Signale beeinflussen, hat sich als harte Nuss erwiesen. Wenn sie erst einmal geknackt ist, könnten nach Überzeugung einiger Wissenschaftler auch diese Moleküle dazu dienen, das Haarwachstum zu fördern oder zu hemmen.

Die Vielzahl der Moleküle zu identifizieren, von denen Entstehung und Verhalten der Haarfollikel abhängen, ist sicher eine anspruchsvolle Aufgabe. Aber die Entschlüsselung des menschlichen Genoms nach seiner überraschend schnellen Entzifferung macht große Fortschritte. Daher sollte es auch bald gelingen, an den interessierenden Zelltypen in Reinkultur all die Gene zu ermitteln, die in den verschiedenen Stadien der Entwicklung und des Aktivitätszyklus von Haarfollikeln angeschaltet werden. Als Nächstes gilt es dann festzustellen, wie diese komplexen Aktivitätsmuster bei Menschen mit gestörtem Haarwuchs verändert sind. Mit verfeinerten Techniken sollten Dermatologen zudem weitere Proteine aufspüren können, die für das Haarwachstum eine wichtige Rolle spielen, und herausfinden, welche davon bei Haarausfall Anomalien zeigen.

Wenn dann Substanzen identifiziert sind, die gestörte Signalwege wiederherstellen und ruhende Haarfollikel aufwecken können, müssten sie zunächst im Tierversuch erprobt werden. In einem nächsten Schritt bestünde die Möglichkeit, menschliche Kopfhaut auf Mäuse mit defektem Immunsystem zu transplantieren, die das fremde Gewebe deshalb nicht abstoßen. So ließe sich feststellen, ob Haarfollikel von Menschen und Mäusen ähnlich auf die zu prüfenden Substanzen reagieren. Bei positivem Ergebnis könnten schließlich klinische Tests am Menschen folgen.

Wie weit der Weg von der hier dargestellten Grundlagenforschung bis zu einer wirksamen Haartinktur ohne gefährliche Nebenwirkungen ist, lässt sich schwer abschätzen. Aber die Forschung schreitet mit Riesenschritten voran. Wenn dieses Tempo anhält, meint Elaine Fuchs, werden die Steuerungsmechanismen des Haarwachstums schon in fünf Jahren weitgehend aufgeklärt sein. Für künftige Männergenerationen dürfte die Glatze dann kein Schicksal mehr sein. ■



DPA

Wie die buschigen Augenbrauen von Theo Waigel illustrieren, ist die Verteilung der Haarfollikel und ihre jeweilige Aktivität genetisch bestimmt.

Literaturhinweise

Thema Haarausfall. Neue Erkenntnisse bei Haarwuchsstörungen. Von R. Happle (Hg.). Oberstebrink, Ratingen 2002.

Haar – alles klar? Haarausfall genauer betrachtet. Von A. Renkawitz. Verlag im Kilian, Marburg 1998.

Wenn die Haare ausgehen. Alles über Haarprobleme. Von F. Vennemann. Humboldt-Taschenbuchverlag Jacobi, München 1997.

Morphogenesis and Renewal of Hair Follicles from Adult Multipotent Stem Cells. Von H. Oshima, A. Rochat, C. Kedzia, K. Kobayashi und Y. Barrandon in: Cell, Bd. 104, Nr. 2, S. 233, 26. 1. 2001.

The Biology of Hair Follicles. Von Ralf Paus und George Cotsarelis in: New England Journal of Medicine Bd. 341 Nr. 7, S. 491, 12. 8. 1999.

Multiple Roles for Activated LEF/TCF Transcription Complexes During Hair Follicle Development and Differentiation. Von Ramanuj Das Gupta und Elaine Fuchs in: Development, Bd. 126, Nr. 20, S. 4557, 1.10. 1999.

Weblinks bei **www.spektrum.de** *unter „aktuelles Heft“*

Ricki L. Rusting *ist Redakteurin bei Scientific American.*

Der Geodynamo im Labor

Aufwendige Experimente erbrachten den Nachweis: Rotierende, elektrisch leitende Flüssigkeiten können ein stabiles Magnetfeld erzeugen. Zugleich gelang es damit, die Entstehung des Erdmagnetfelds im Labor zu simulieren.

Von Ulrich Müller und Robert Stieglitz

Bereits den alten Kulturvölkern in China und Mexiko waren die magnetischen Kraftwirkungen des Magneteisensteins bekannt. Die Chinesen waren vermutlich die Ersten, welche die Nord-Süd-Ausrichtung einer Magnetnadel für die Navigation nutzten. Im Mittelalter setzten auch europäische Seefahrer solche Magnetkompasse ein. Der englische Arzt und Naturforscher William Gilbert (1544–1603) fasste in seinem 1600 veröffentlichten Buch „De Magnete“ erstmals systematisch die Erkenntnisse über Magnetismus und das Erdmagnetfeld zusammen. Aus eigenen Experimenten und aus Vermessungen des irdischen Feldes mit Schiffen der englischen Flotte schloss er, dass sich die Erde wie ein Permanentmagnet verhält, dessen Pole sich in der Nähe des geographischen Nord- und Südpols befinden.

Die Stärke des Erdmagnetfeldes schwankt und schrumpft derzeit jährlich um 0,07 Prozent

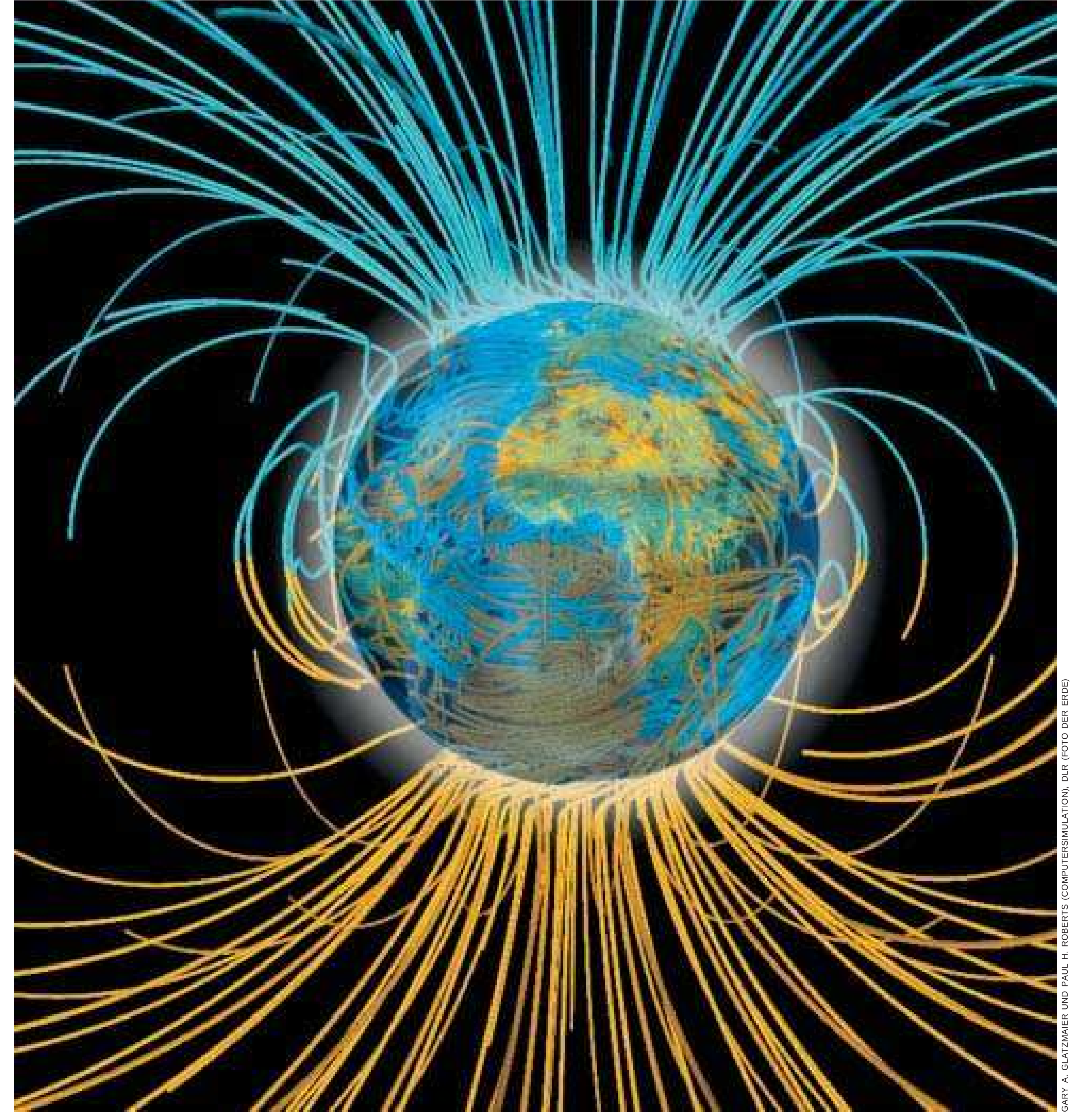
An der Oberfläche der Erde ist das geomagnetische Feld nur etwa ein Zehntausendstel so stark wie ein handelsüblicher Permanentmagnet. Aus regelmäßigen Beobachtungen in den letzten 150 Jahren weiß man, dass das Erdmagnetfeld zeitlich und räumlich variiert. So hat sich der magnetische Nordpol seit 1831 – dem Zeitpunkt seiner ersten Lagebestimmung durch eine britische Polarexpedition – um mehrere hundert Kilometer nach Nordwesten verschoben. Auch die lokale Stärke des Magnetfeldes an der Erdoberfläche ist messbaren Schwankungen unterworfen; Variationen treten in weiten Zeitskalen von wenigen Sekunden bis zu Jahrmillionen auf. Die Geophysiker wissen heute, dass die kurzzeitigen Fluktuationen durch äußere Einwirkungen aus der Ionosphäre verursacht werden, während die langfristigen Schwankungen mit Prozessen im Erdinneren in Zusammenhang stehen.

In den langfristigen Änderungen – den so genannten Säkularvariationen – sind zwei Trends erkennbar. Zum einen verschiebt sich das Magnetfeldmuster an der Erdoberfläche pro Jahr um etwa 0,2 Grad westwärts. Zum anderen nimmt die Stärke des Erdmagnetfeldes jährlich um 0,07 Prozent ab. Hält diese Abnahme an, so wird das Magnetfeld in rund 4000 Jahren verschwunden sein. Aus Gesteinsproben mit magnetisierten Einschlüssen können die Wissenschaftler schließen, dass die Erde seit rund 3,5 Milliarden Jahren ein Magnetfeld aufweist, und dass sich dieses mehrere hundert Mal umgepolt hat. Dies ist im Mittel etwa alle 500000 Jahre geschehen, wobei sich die Umpolung relativ rasch in Zeiträumen von wenigen tausend Jahren vollzogen hat (vergleiche „Umkehr des Erdmagnetfeldes: Aufschluss über den Geodynamo“, Spektrum der Wissenschaft 7/1988, S. 84).

Noch im 19. Jahrhundert nahmen einige Wissenschaftler an, dass das Erdmagnetfeld von einem ferritischen Permanentmagneten im Erdinnern herrühre. Seismische und andere geophysikalische Messungen an der Erdoberfläche haben jedoch ergeben, dass die Temperaturen im Erdinneren weit höher sind als die Obergrenze von etwa 800 Grad Celsius, bis zu der Ferromagnetismus auftreten kann. Ein ferritischer Permanentmagnet ist somit als Ursache für das Erdmagnetfeld auszuschließen.

Könnte die Erde vielleicht bei ihrer Entstehung ein externes Magnetfeld in ihre Materie gleichsam eingefroren haben? Solche Felder würden nach den Gesetzen der Elektrodynamik langsam zerfallen. Für die Erde wäre das bereits nach rund 10000 Jahren der Fall. Weil das irdische Magnetfeld aber nachweislich seit mehr als drei Milliarden Jahren besteht, erhebt sich die Frage, durch welchen Mechanismus im Erdinnern es aufrechterhalten wird und was seine zeitlichen und räumlichen Veränderungen bewirkt.

Joseph Larmor (1857–1942), Physikprofessor an der Universität Cambridge (England), gab 1919 einen ersten Hinweis auf des Rätsels Lösung. Er vermutete, die



Das Erdmagnetfeld hat vom Weltraum aus gesehen die Struktur eines Dipols: Die Feldlinien treten in der Nähe des magnetischen Südpols aus und in der Umgebung des Nordpols wieder ein. Diese Computersimulation der beiden US-Physiker Gary A. Glatzmaier und Paul H. Roberts zeigt auch den komplizierten Feldlinienverlauf innerhalb der Erde, die als Satellitenaufnahme einmontiert ist.

an der Sonnenoberfläche beobachteten Magnetfelder würden durch die Strömung elektrisch leitender Materie im Inneren des rotierenden Sonnenkörpers erzeugt. Er führte das solare Magnetfeld somit auf einen Dynamo-Effekt zurück. Der amerikanische Physiker Walter M. Elsasser und der britische Geophysiker Edward C. Bullard haben diese Idee vor fünfzig Jahren aufgegriffen und auf die irdischen Verhältnisse übertragen.

Ein Dynamo im Erdinneren wird naturgemäß nicht die Struktur eines Fahrraddynamos oder von Stromgeneratoren in Kraftwerken haben können. In solchen technischen Geräten dreht sich eine komplizierte Anordnung von Leiterspulen und ferritischem Material, genannt Rotor, relativ zu einer ähnlichen, aber ruhenden Stator-Anordnung und induziert in dieser einen Strom. Im Erdinneren kommt stattdessen eine metallische Schmelze in Frage, die leicht strömt und ein guter elektrischer Leiter ist. In Verbindung mit der Erdrotation könnte diese Schmelze als bewegter Leiter eines Dynamos fungieren, der ein vorhandenes Magnetfeld verstärkt und auf Dauer aufrechterhält (vergleiche „Die Entwicklung des Erdmagnetfeldes", Spektrum der Wissenschaft 2/1990, S. 52).

Das Verhalten von elektrischen Strömen und Magnetfeldern in bewegten elektrischen Leitern – gleich, ob in Drähten oder in metallischen Schmelzen – wird durch drei Grundgesetze der Elektrodynamik bestimmt:

➤ Jeder elektrische Stromleiter ist von magnetischen Feldlinien umschlossen;

➤ in Leitern, die quer zu Magnetfeldlinien bewegt werden, wird eine elektrische Spannung induziert und es fließt ein elektrischer Strom;

➤ in elektrisch gut leitenden Flüssigkeiten wie etwa metallischen Schmelzen sind ▶

die Magnetfeldlinien quasi in der Materie eingefroren und bewegen sich wie elastische Bänder mit dieser mit.

Insbesondere können die Feldlinien durch die Strömung gestreckt, gedreht oder gefaltet werden. Dabei wird durch die Streckung am Magnetfeld mechanische Arbeit geleistet und die magnetische Feldenergie zu Lasten der Bewegungsenergie der Strömung verstärkt. Die Fachwissenschaftler bezeichnen diesen Prozess als Alpha-Effekt (Kasten auf Seite 60).

Ein weiterer geophysikalisch relevanter Mechanismus, der ein schwaches Magnetfeld verstärken kann, beruht auf einer Aufspulung von Magnetfeldlinien, wenn ein Strömungswirbel Scherkräften ausgesetzt ist. Experimentell lässt sich eine solche Strömung erzeugen, wenn man eine Flüssigkeit zwischen zwei konzentrische Kugelschalen füllt, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit drehen. Dieser Vorgang heißt Omega-Effekt. Wird ihm ein Alpha-Prozess nachgeschaltet, etwa durch Erzeugen einer zusätzlichen Wirbelbewegung innerhalb der Spaltströmung, so wird der Selbstverstärkungszyklus geschlossen. Die Physiker sprechen in diesem Zusammenhang von einem Alpha-Omega-Dynamo.

In elektrisch gut leitenden Flüssigkeiten sind die Magnetfeldlinien gleichsam eingefroren

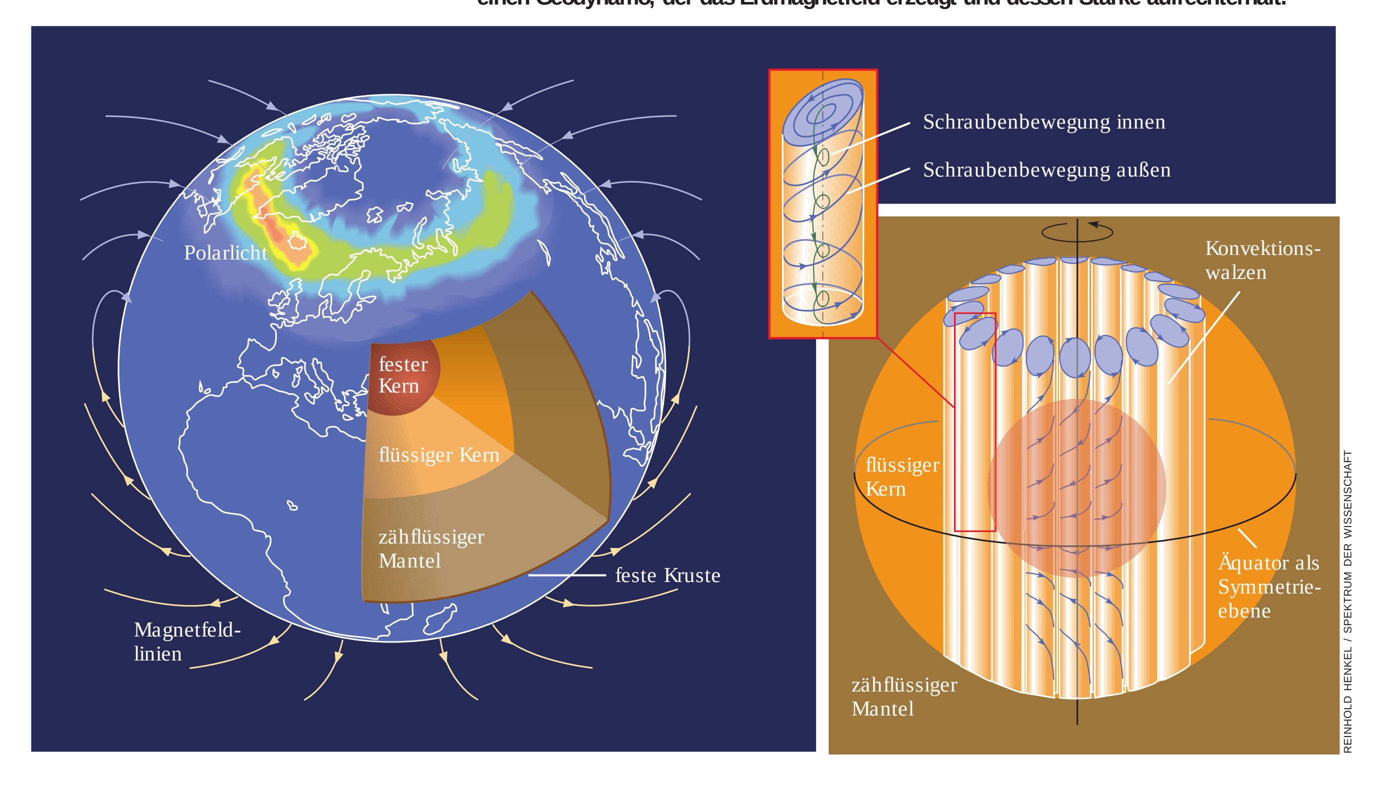
Im schmelzflüssigen Kern der Erde sind vermutlich beide Mechanismen wirksam (vergleiche „Wie entsteht das Magnetfeld der Erde?“, Spektrum der Wissenschaft, 4/1979, S. 41). Die hier vorgestellten kinematischen Dynamomechanismen sind indes noch zu einfach, um alle beobachteten Eigenschaften des Erdmagnetfeldes beschreiben zu können. Es müssen vielmehr auch die thermodynamischen Prozesse in einer strömenden Schmelze berücksichtigt werden.

Wenngleich direkte Messungen nur in der Erdkruste bis zu wenigen Kilometern Tiefe möglich sind, haben die Geophysiker doch ziemlich detaillierte Vorstellungen über den Aufbau unseres Planeten gewinnen können. Zu diesem Gesamtbild haben genaue Analysen von Erdbebenwellen, die durch das Erdinnere laufen, ebenso beigetragen wie allgemeine thermodynamische Abschätzungen. So lässt sich aus einer Wärmebilanz an der Erdoberfläche und aus Dichteschichtungen im Erdinneren auf Druck und Temperatur im Erdkern schließen. Der Druck erreicht dort etwa 3,5 Milliarden Pascal, also das 3,5millionenfache des atmosphärischen Druckes auf Seehöhe (etwa 1000 Pascal), während die Temperatur Werte um 6300 Grad Celsius erreicht.

Der innere Teil des Kerns hat einen Radius von etwa 1200 Kilometern und besteht aus festem Eisen und Nickel. Er ist umhüllt von einer etwa 2700 Kilometer dicken Kernschale aus einer schmelzflüssigen metallischen Eisen-Legierung mit geringen Beimischungen aus Nickel, Schwefel, Silizium und Sauerstoff. Der metallische Aufbau des Kerns ist naturgemäß mit einer guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit verbunden. Um den Kern schließt sich der Erdmantel mit einer Gesamtschichtdicke von etwa 2900 Kilometern an, der sich im Wesentlichen aus Verbindungen der leichteren Elemente Silizium, Sauerstoff und Magnesium zusammensetzt. Die elektrische und die thermische Leitfähigkeit dieser Materialien ist gering. Der Erdmantel ist wiederum in mehrere zähflüssig bis plastisch-elastische Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung untergliedert. Im Gegensatz zum „wasser“-flüssigen äußeren Kern hat der Erdmantel keine Bedeutung für den Dynamomechanismus.

Mehr noch als diese statische Struktur der Erde sind vor allem Bewegungen im flüssigen Kern für den Dynamovorgang bedeutsam. Durch tiefenabhängige Unterschiede in der Temperatur und in der chemischen Zusammensetzung der Schmelze entstehen Dichtegradienten, die Auftriebsströmungen erzeugen. Angetrieben werden diese Konvektionsbewegungen vor allem durch die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, die permanent neu erzeugt werden, weil die

Wenn sich Teilchen des Sonnenwindes im Erdmagnetfeld verfangen, entstehen rings um die Pole leuchtende Polarlichter (links). Die wahre Ursache dafür verbirgt sich tief im Erdinneren: Im äußeren Kern, der aus schmelzflüssigem Eisen besteht, entstehen durch Dichteunterschiede und die Rotation der Erde walzenartige Strömungsmuster (rechts). Innerhalb dieser Konvektionswalzen bewegt sich die Schmelze schraubenartig nach innen beziehungsweise nach außen. Diese Strömungen des leitfähigen Eisens bilden einen Geodynamo, der das Erdmagnetfeld erzeugt und dessen Stärke aufrechterhält.

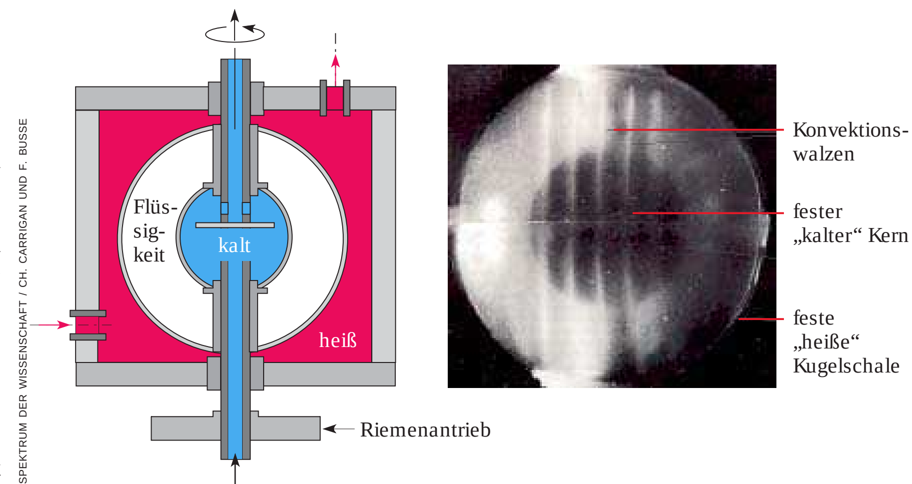


schwereren Komponenten der Schmelze am äußeren Rand des festen Kerns ausfrieren. Dadurch reichern sich in einer benachbarten dünnen Schicht die leichteren Komponenten an, die dann im Schwerefeld aufzusteigen beginnen. Das Ausfrieren der metallischen Schmelze am festen inneren Kern wird durch eine andauernde Abkühlung unseres Planeten verursacht: Er strahlt an seiner Oberfläche pro Quadratmeter 0,08 Watt Wärme ab.

Ohne die Drehung der Erde würde der konvektive Wärme- und Stoffaustausch in der flüssigen Zone im Wesentlichen rein radial erfolgen, und zwar mit einer relativ geringen Geschwindigkeit von ungefähr einem Millimeter pro Sekunde. Wegen der schnellen Rotation unseres Planeten, die im flüssigen Kern eine mittlere Geschwindigkeit von etwa zehn bis dreißig Metern pro Sekunde bewirkt, entstehen jedoch starke Corioliskräfte, die senkrecht zur Auftriebsbewegung an der schmelzflüssigen Materie angreifen. Der Theoretiker Friedrich Busse von der Universität Bayreuth hat in den 1970er Jahren an der Universität von Kalifornien in Los Angeles gezeigt, dass sich dadurch geordnete Strömungsstrukturen in Form von Konvektionswalzen ausbilden, deren Achsen parallel zur Rotationsachse der Erde ausgerichtet sind (Grafik Seite 58 rechts).

Diese Konvektionswalzen bilden einen Ring um den festen Erdkern herum. Je nach Intensität der Dreh- und Konvektionsbewegung können sie auch in mehreren Schichten nebeneinander auftreten. Jede einzelne Konvektionswalze wird am unteren Rand des Erdmantels von einer „festen“ Wand aus sehr zäh-plastischem Material begrenzt. Das Abbremsen der Konvektionsbewegung an dieser Grenze löst eine zum Walzenzentrum gerichtete Strömung aus. Dadurch entsteht eine in der Nähe der Walzenachse abwärts gerichtete Spiral-Strömung, die durch Abtriebskräfte noch verstärkt wird. Diese Vorgänge laufen auf der Süd- und Nordhalbkugel spiegelsymmetrisch ab. Insgesamt betrachtet sollte sich also im schmelzflüssigen, gut leitenden äußeren Erdkern eine verhältnismäßig wohl geordnete Verteilung von Strömungswirbeln mit einer schraubenförmigen Geschwindigkeitsstruktur einstellen.

Diese Modellvorstellungen vermochten Charles Carrigan und Friedrich Busse in Experimenten, die sie Ende der 1970er Jahre an der Universität von Kalifornien in Los Angeles durchführten, überzeugend zu bestätigen. Carrigan versetzte bei diesen Versuchen Flüssigkeit in einem kugelschalenförmigen Volumen in sehr schnelle Rotation (ungefähr 1000 Umdrehungen pro Minute). Durch Erwärmen der äußeren und Kühlen der inneren Fläche erzeugte er ein Temperaturgefälle, das eine thermische Konvektionsströmung auslöste. Parallel zur Rotationsachse der Flüssigkeit bildeten sich Wirbelwalzen aus (Bild oben).



Wie ein Walzenmuster im schmelzflüssigen Kern der Erde entstehen kann, demonstrierten Ende der siebziger Jahre Charles Carrigan und Friedrich Busse an der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Sie versetzten eine Flüssigkeit, die zwischen einem gekühlten inneren Kern und einer beheizten äußeren Kugelschale eingeschlossen war, in rasche Rotation (links). Durch Zusammenwirken von Auftriebs- und Corioliskräften entstand im Kugelspalt ein Walzenmuster, das sich in Form heller Streifen sichtbar machen ließ (rechts).

Kann nun ein solches Wirbelsystem tatsächlich ein magnetisches Feld erzeugen und aufrechterhalten? Dieser Frage konnten die Wissenschaftler erst gezielt nachgehen, nachdem genügend Rechenleistung auf Großrechnern zur Verfügung stand. In den letzten zehn Jahren haben Forschergruppen in den USA, Japan, Deutschland und England versucht, die räumlichen magnetohydrodynamischen Vorgänge im Erdinneren numerisch zu berechnen und auf diese Weise den Geodynamo zu simulieren. Dabei konnten sie bemerkenswerte Erfolge in der Modellierung des komplexen Systems aus Strömungen, Rotationsbewegungen, elektrischen Strömen und Magnetfeldern erzielen. So haben sie den Dynamo-Effekt in vielen Einzelheiten für Strukturen rechnerisch beschrieben, deren Geometrie und materielle Zusammensetzung dem Aufbau der Erde entspricht.

Am Computer ließen sich Westwärtsdrift und Umpolung des Erdmagnetfeldes simulieren

Aber selbst heute reicht die Rechenkapazität der größten Computer noch nicht aus, um die realen Abläufe im Erdinneren auf den besonders interessierenden geophysikalischen Zeitskalen von Tagen bis zu etwa 10 Millionen Jahren und auf Längenskalen von 10 bis zu 3500 Kilometern zu simulieren. Dennoch gelang es, eine Vielzahl grundlegender geomagnetischer Erscheinungen und vermuteter interner Strömungsvorgänge überraschend gut durch numerische Rechnungen zu beschreiben. Gary Glatzmaier aus dem Nationallaboratorium in Los Alamos und Paul Roberts von der Universität von Kalifornien in Los Angeles stellten 1995 eine erste Simulation des dipolförmigen Magnetfeldes der Erde vor (Grafik Seite 57). Dabei haben sie auch die Umpolung und die Westwärtsdrift des Magnetfeldes erfasst.

Mehrere Forschungsgruppen in verschiedenen Ländern – darunter Friedrich Busse, Andreas Tilgner und Eike Grote von der Universität Bayreuth – versuchen die Wechselwirkung zwischen konvektiven Strömungsvorgängen in Kugelschalen und einem selbsterregten Magnetfeld möglichst detailliert zu berechnen. Zwei Phänomene stechen dabei hervor: Die Konvektionswalzen werden durch Corioliskräfte im Querschnitt spiralig abgeflacht, und die zonalen Magnetfeldlinien werden in mittleren Breiten unter der Transportwirkung der einzelnen Konvektionswirbel wellenartig verformt (Grafik Seite 61).

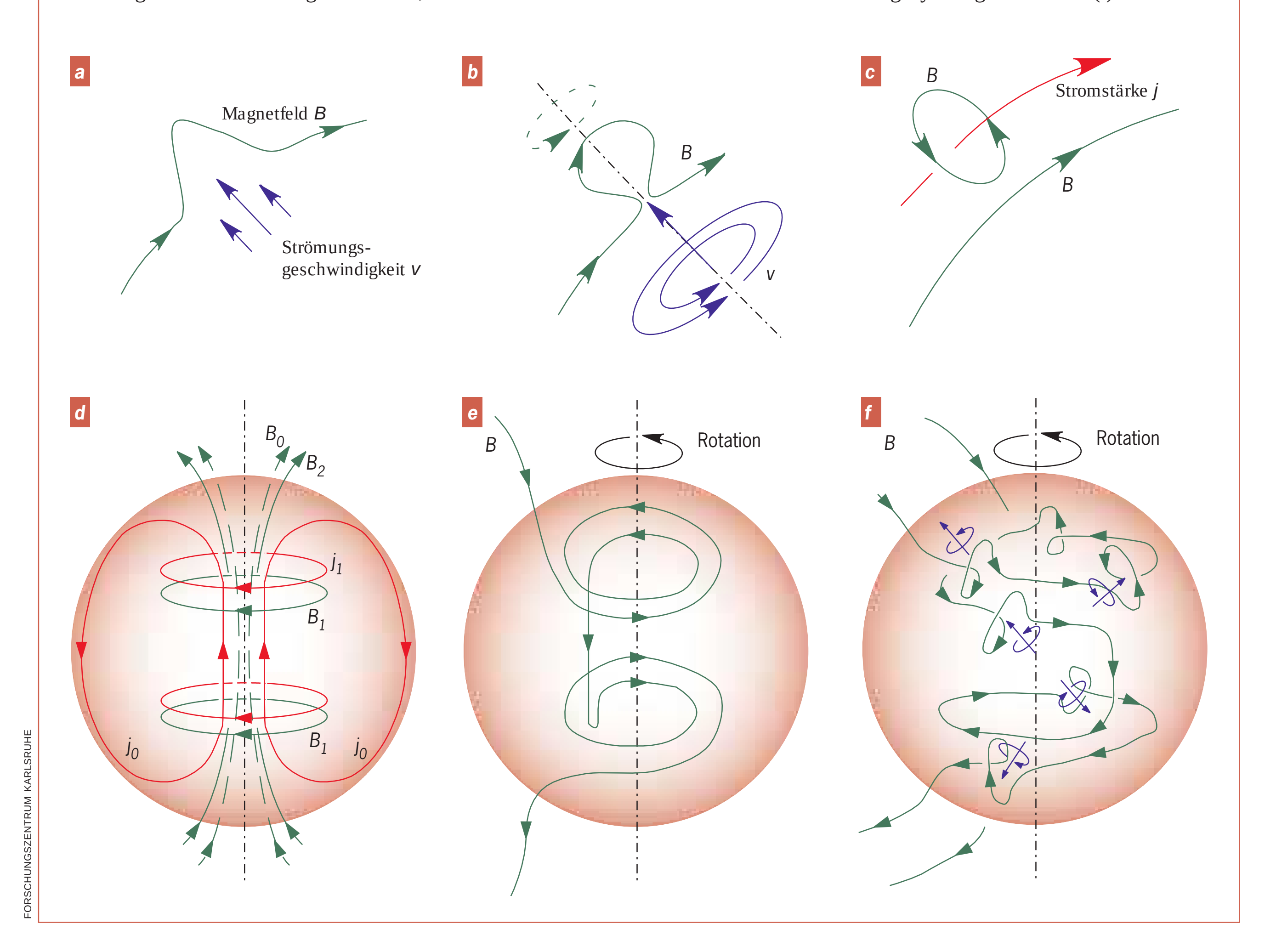
Theoretische Überlegungen haben gezeigt, dass ein experimenteller Nachweis des Geodynamos nur mit großem experimentellen Aufwand zu erreichen ist. Man muss dabei zudem verschiedene Abweichungen vom geophysikalischen Vorbild hinnehmen. Zum Beispiel sind die Auf- ▶

Wie ein Magnetfeld sich selbst verstärkt

Magnetfeldlinien können durch Strömungsfelder in einer leitenden Flüssigkeit verformt (a) und sogar zu in sich geschlossenen Schleifen „kurzgeschlossen“ werden (b). Die geschlossene Feldlinie ist ihrerseits mit einem elektrischen Strom verknüpft (c). Bei geeigneter Strömung kann der Strom in Richtung des ursprünglichen Magnetfelds fließen. Diesen Vorgang nennen die Physiker Alpha-Effekt.

Wiederholt sich dieser Vorgang an einem Abschnitt einer bereits geschlossenen Magnetfeldlinie, so verstärkt sich das ursprüngliche Magnetfeld durch mechanische Rückkopplung (d). Dies stellt ein wesentliches Element des Dynamo-Prozesses dar.

Zu einer Selbstverstärkung des Magnetfeldes kann noch ein zweiter Effekt führen: wenn nämlich in einem Strömungswirbel, in dem Scherkräfte wirken, Magnetfeldlinien aufgespult werden (e). Schaltet man im Experiment diesem so genannten Omega-Effekt einen Alpha-Effekt nach, so wird der Selbstverstärkungszyklus geschlossen (f).



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

triebskräfte im Erdinneren, welche die Konvektion antreiben, im Experiment durch Strömungspumpen oder Rührpropeller zu ersetzen. An die Stelle des realen geophysikalischen Dynamoproblems tritt auf diese Weise ein so genanntes kinematisches Dynamoproblem mit einer vorgegebenen wirbelbehafteten, räumlichen Strömung.

Das kinematische Problem kommt dabei dem geodynamischen umso näher, je stärker das im Experiment vorgegebene Strömungsfeld demjenigen im flüssigen Erdkern ähnelt. Der Mindestaufwand für ein solches Experiment wird von der verfügbaren Versuchsflüssigkeit, ihren elektrischen, thermischen und fluidmechanischen Eigenschaften sowie den verfügbaren Pump- beziehungsweise Rührleistungen bestimmt. Die Abmessungen der Versuchsapparatur müssen dabei gewährleisten, dass die durch mechanische Streckung und Torsion der Magnetfeldlinien erzielte Vergrößerung der magnetischen Energie deren Vernichtung durch elektrische Ströme in den Ohmschen Widerständen der Materialien übertrifft.

Ein Maßstab dafür ist die so genannte magnetische Reynolds-Zahl. Diese dimensionslose Kennzahl ist das Produkt aus einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit des flüssigen Leiters, einer typischen Größe des Strömungswirbels sowie zwei Materialeigenschaften, der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Permeabilität. Die magnetische Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis der erzeugten zur verloren gehenden Energie des magnetischen Feldes.

Für den eindeutigen Nachweis des Dynamo-Effektes im Experiment muss diese Kennzahl einen Wert deutlich größer als Eins annehmen. Um dies zu erreichen, wählt man eine metallische Flüssigkeit mit möglichst hoher elektrischer

Leitfähigkeit, niedriger Viskosität und niedriger Schmelztemperatur. Diese Eigenschaften hat Natrium, das bei Temperaturen oberhalb 97 Grad Celsius flüssig ist. Es ergeben sich dann Mindestabmessungen für die Versuchsapparatur von einem bis zu mehreren Kubikmetern bei Strömungsgeschwindigkeiten von fünf bis zwanzig Metern pro Sekunde. Bisher haben zwei Arbeitsgruppen Versuche von dieser Größe erfolgreich durchgeführt: eine im Institut für Physik in Riga (Lettland) und die andere im Forschungszentrum Karlsruhe.

Die lettische Forschungsgruppe unter Leitung von Agris Gailitis hatte 1987 in einem ersten Experiment versucht, den Dynamo-Effekt an einem schraubenförmigen Einzelwirbel nachzuweisen, der von ruhendem flüssigen Natrium umgeben war. Ein solches Geschwindigkeitsfeld entspricht einem einzelnen Walzenwirbel im Erdkern. Technisch realisiert wurde es durch einen Drallerzeuger mit Leitblechen im Einlauf eines breiten, langen Rohres. Die Versuchsflüssigkeit wurde in einem äußeren Mantel zum Rohreinlauf zurückgeführt. Betrieben wurde die Versuchsapparatur mit einer magnetohydrodynamischen Pumpe, die pro Stunde 1200 Kubikmeter Flüssigkeit fördern konnte.

Gailitis und seine Mitarbeiter konnten mit dieser Versuchsanordnung zweierlei zeigen: Ein von außen angelegtes magnetisches Wechselfeld wird durch die schraubenförmige Natriumströmung deutlich verstärkt, und das Abklingen des Magnetfeldes nach Ausschalten der äußeren Stromquelle verzögert sich signifikant. Dies war ein deutliches Anzeichen dafür, dass die kritischen Bedingungen für die Selbsterregung eines Magnetfeldes fast erreicht wurden.

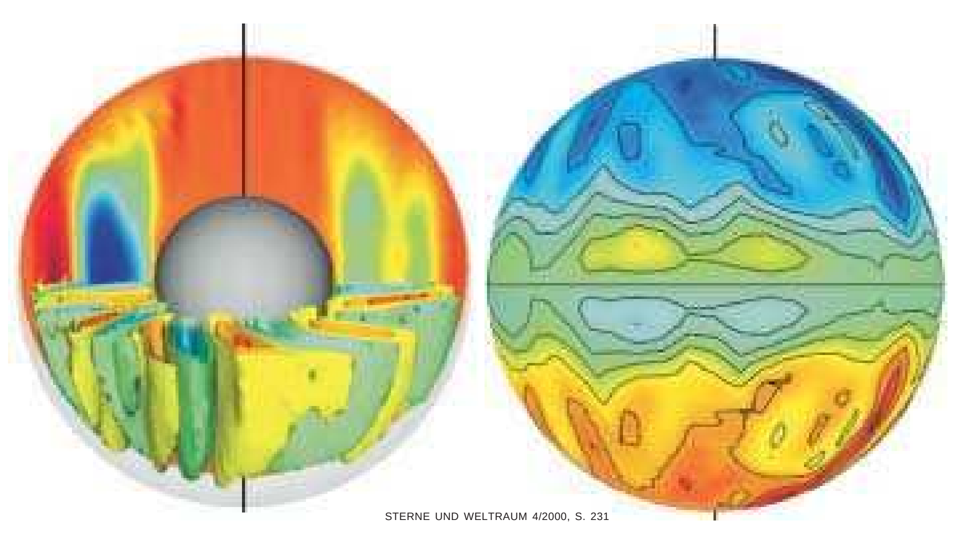
Die lettische Forschergruppe konnte zwar für ihre Dynamo-Versuchsanordnung den Wert der kritischen magnetischen Reynoldszahl ermitteln, für den das Magnetfeld sich von selbst aufrechterhält. Doch ein mechanischer Fehler verhinderte das Erreichen eines aktiven Dynamozustandes. Für ein zweites Experiment bauten deshalb Gailitis und Gunter Gerbeth aus Dresden mit ihrem Team einen vereinfachten, in den Abmessungen aber ähnlichen Versuchsstand auf. Damit gelang es ihnen, ein selbsterregtes, quasi periodisch oszillierendes Magnetfeld zu erzeugen. Damit war erstmals der homogene Dynamo-Effekt experimentell nachgewiesen worden.

Im Experiment entstand ein großräumiges, im zeitlichen Mittel stationäres Magnetfeld

Mit dem Strömungsfeld im flüssigen Erdkern hat ein von Glyn Roberts an der Universität Newcastle upon Tyne (England) vorgeschlagenes Geschwindigkeitsfeld eine gewisse Ähnlichkeit: Rechts und links drehenden Wirbeln, die periodisch angeordnet sind, ist eine axiale, in der Richtung alternierende Geschwindigkeit überlagert. Friedrich Busse hat das Roberts'sche Geschwindigkeitsfeld modifiziert und in einen Zylinder endlicher Ausdehnung eingebettet. Diese Anordnung soll Busse zufolge die Wirbelstrukturen im Inneren rotierender Planeten charakterisieren. Der Bayreuther Theoretiker errechnete, dass eine magnetische Selbsterregung dieser Strömung bei relativ niedrigen magnetischen Reynolds-Zahlen um etwa zehn auftritt. Um diese Werte technisch zu realisieren, wäre ein zylindrischer Versuchsbehälter von einem Meter Radius und einem Meter Höhe erforderlich. Die Strömungsgeschwindigkeit der Versuchsflüssigkeit Natrium müsste bei einer Anzahl von 52 Wirbelzellen etwa fünf bis zehn Meter pro Sekunde betragen. Busse schlug vor, nach diesem Konzept ein Experiment aufzubauen, wobei das Strömungsfeld durch extern angebrachte Pumpen in Wirbelgeneratoren erzeugt werden sollte.

Wegen der langjährigen Tätigkeit in der Reaktortechnik verfügt das Forschungszentrum Karlsruhe über umfassende Erfahrungen mit Strömungen von flüssigem Natrium. Unsere Arbeitsgruppe begann dort 1992, einen Versuchsaufbau zu entwickeln. Dessen zentraler Bestandteil ist der so genannte Dynamomodul, der aus 52 Wirbelgeneratoren besteht. Mit Hilfe von Rohr-Umlenkungen an deren Enden wird darin das von Busse vorgeschlagene Geschwindigkeitsfeld erzeugt. Die Strömung im Modul bewirkt ein Versorgungskreislauf mit drei magnetohydrodynamischen Pumpen: Zwei treiben die Wirbelströmungen an, die dritte die axiale Strömung. Der Dynamo-Versuchsstand ging 1999 in Betrieb.

Wie bereits die ersten Experimente zeigten, bildet sich bei einem Natrium-Volumenstrom von etwa 120 Kubikmetern pro Stunde in den Strömungskanälen der Wirbelgeneratoren ein großräumiges, im zeitlichen Mittel stationäres Magnetfeld aus. Dieses Feld ist etwa 100-mal stärker als das Erdmagnetfeld. Wie das irdische Vorbild weist es eine Dipolstruktur auf, wobei die Dipolrichtung quer zur Achse des Dynamomoduls liegt. ▶



Eine Computersimulation von Forschern der Universität Bayreuth zeigt zwei besondere Details. Die Konvektionswalzen, die ein Geodynamo in einer rotierenden Kugelschale ausbildet, werden im Querschnitt spiralig abgeflacht (links; dargestellt sind Flächen gleicher Geschwindigkeit in radialer Richtung, im unteren Teilbild räumlich, im oberen in einer Meridian-Schnittlinie). Man beachte, dass Linien gleicher Radialkomponente des Magnetfelds an der äußeren Oberfläche der Kugelschale nicht parallel zum Äquator verlaufen, sondern wegen der Transportwirkung der einzelnen Konvektionswirbel in mittleren Breiten wellenartig verformt sind (rechts). Blau zeigt negative, rot positive Werte der Radialkomponente des Magnetfeldes an; hellgrün entspricht der Feldstärke null.

STERNE UND WELTRAUM 4/2000, S. 231

Der Karlsruhe-Dynamo

Um den Geodynamo experimentell zu simulieren, war ein komplizierter Versuchsaufbau erforderlich. Theoretische Grundlage des Experiments bildete ein Strömungsfeld, das Glyn Roberts an der Universität Newcastle upon Tyne (England) vorgeschlagen hatte: Rechts und links drehende Wirbel sind alternierend in einem periodischen Gitter angeordnet; in ihnen strömt die Flüssigkeit abwechselnd nach oben oder unten (*a*). Friedrich Busse von der Universität Bayreuth und die Autoren wandelten dieses Strömungsfeld in ein technisch umsetzbares Konzept um: 52 Wirbelzellen (*b*) sind in einem Zylinder von etwa zwei Meter Durchmesser eingebettet (*c*). Für zwei dieser Zellen sind die innere Struktur sowie die Umlenkrohre an ihren Enden in der Grafik dargestellt (grün). Leitbleche sorgen für einen spiralförmigen Verlauf der Strömung.

Nach diesen Vorgaben bauten Arbeitsgruppen am Forschungszentrum Karlsruhe ein Experiment auf. Das Dynamomodul hat von außen eine zylindrische Form (linkes Foto) und enthält im Inneren 52 Wirbelgeneratoren, die paarweise so mit Umlenkrohren verbunden sind, dass sich ein geschlossener Strömungskreislauf ergibt (rechtes Foto). Durch diese Anord-

a theoretisches Strömungsfeld

b einzelne Wirbelzelle

c komplettes Dynamomodul

Der beobachtete Beginn der Dynamowirkung und die Ausrichtung des Magnetfeldes stimmen gut mit theoretischen Vorhersagen für diese Versuchsanordnung überein, die von Andreas Tilgner aus Bayreuth (jetzt an der Universität Göttingen) und Karl Heinz Rädler vom Astrophysikalischen Institut in Potsdam stammen. Durch geschickte Wahl der Anfangsbedingungen bei der Versuchsführung konnten wir auch ein Magnetfeld mit entgegengesetzter Richtung erzeugen. Aus einer größeren Anzahl von Einzelversuchen, bei denen unterschiedliche schraubenförmige und axiale Natriumströme durch die Apparatur gepumpt wurden, erstellte unser Team schließlich ein Zustandsdiagramm für einen Dynamobetrieb der Anlage (Grafik links oben im Kasten).

Unsere Experimente im Forschungszentrum Karlsruhe liefern somit den klaren experimentellen Nachweis, dass Wirbelströmungen in einem quasi-homogenen Leiter spontan ein dauerhaftes Magnetfeld erzeugen können. Zugleich bestätigen sie wegen der Analogie zu den vermuteten Strömungsstrukturen im Erdkern das bisherige Modell eines Geodynamos.

Bevor jedoch die beiden erfolgreichen Experimente in Riga und Karlsruhe als vollständige Demonstration für den Geodynamo gelten können, müssen noch zwei deutliche Defizite des Versuchsaufbaus beseitigt werden. Zum einen strömt das flüssige Natrium nicht frei, sondern in eng geführten Kanälen. Damit ist es dem einmal erzeugten Magnetfeld nur beschränkt möglich, über die elektromagnetische Lorentz-Kraft auf die Strömung zurückzuwirken und ihre Form zu verändern. Zum anderen wird die Strömung von außen angetrieben und nicht im Inneren der Versuchsapparatur durch Auftriebskräfte hervorgerufen.

Der dringende Wunsch der Theoretiker nach einem besseren Verständnis der magnetohydrodynamischen Rückkopplung des erzeugten Magnetfeldes auf die

Literaturhinweise

Experimente zum Dynamo-Effekt. Von Andreas Tilgner, Friedrich Busse und Eike Grote in: Sterne und Weltraum, Heft 4/2000, S. 230.

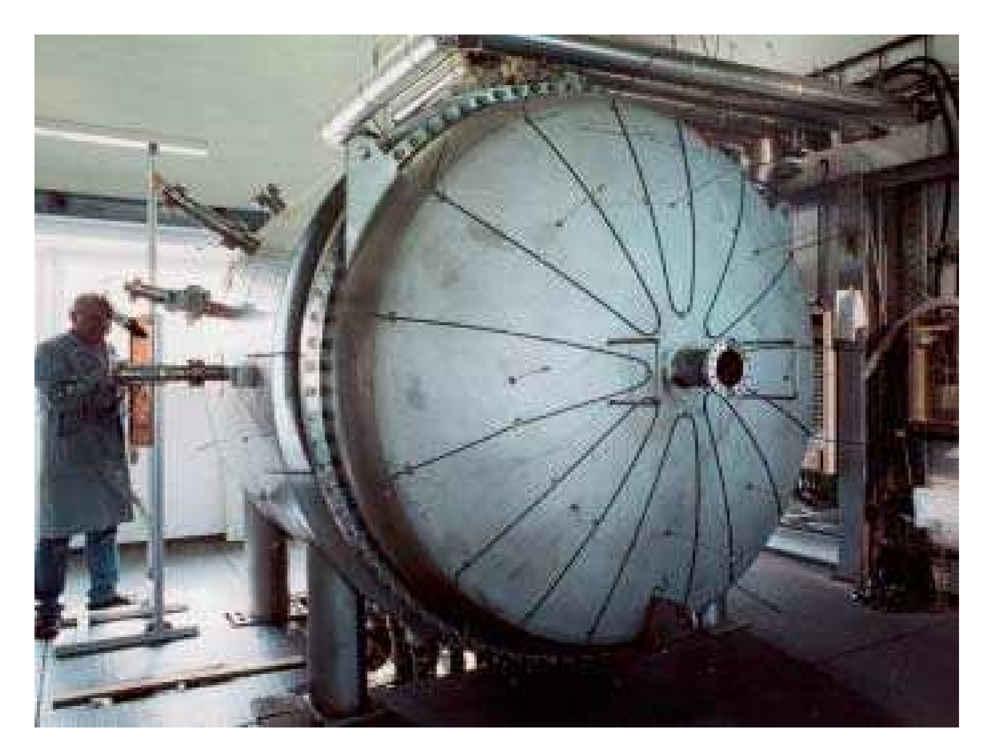
A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. Von Gary A. Glatzmaier und Paul H. Roberts in: Nature, Bd. 377, S. 203 (1995).

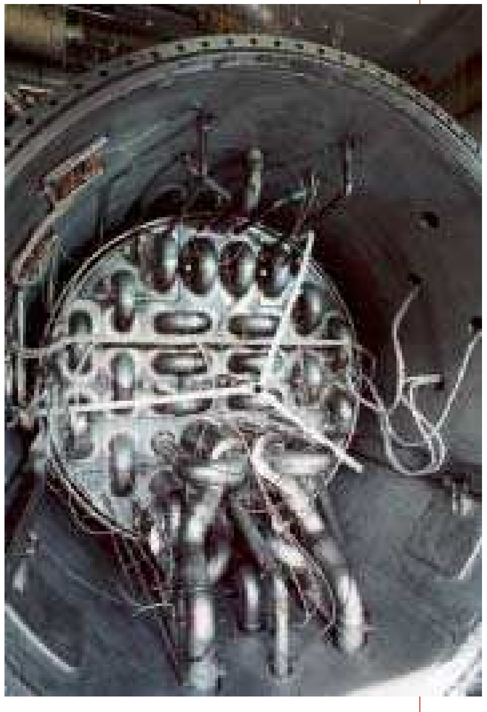
Weblinks: **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft“.

nung wurde flüssiges Natrium hindurchgepumpt mit einem Volumenstrom zwischen 50 und 150 Kubikmetern pro Stunde. Zwei Pumpen treiben die Wirbelströmungen an, eine dritte die Strömung in axialer Richtung.

Als „Saatfeld“ für den Dynamo diente das Erdmagnetfeld, das den Versuchsaufbau durchdringt. Bei hohen Volumenströmen bildet sich ein großräumiges Magnetfeld aus, dessen Stärke wegen der turbulenten Fluktuationen in der Natriumströmung variiert, im zeitlichen Mittel aber stationär ist. Dieses Feld ist rund 100-mal stärker als das Erdmagnetfeld.

Wann nun eine Selbstverstärkung des Magnetfeldes einsetzt, hängt von der Kombination der Volumenströme in der Wirbel- und in der Axialströmung ab. Das Experiment wurde für verschiedene Kombinationen dieser Parameter durchgeführt. Auf diese Weise konnten die Karlsruher Forscher ein Zustandsdiagramm ableiten, das die Zustände der Magnetfeld-Selbstanregung von den Zuständen ohne erzeugtes Magnetfeld abgrenzt.





FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Strömung war Anlass, in Europa und in den Vereinigten Staaten weitere experimentelle Dynamoprogramme ins Leben zu rufen. Zum Einsatz kommen im Wesentlichen kugelförmige oder zylindrische Versuchsbehälter, in denen durch ein oder zwei von außen angetriebene Propeller spiralförmige Ringwirbel erzeugt werden. Die Abmessungen der Behälter sind so gewählt, dass oberhalb bestimmter Wirbelintensitäten der Dynamo-Effekt beobachtet werden sollte. Auf die sich dann frei ausbildende Wirbelströmung könnte ein erzeugtes Magnetfeld naturgemäß viel stärker einwirken als auf die in Kanälen geführte Wirbelströmung des Riga- oder Karlsruhe-Dynamos. Es ist jedoch strömungstechnisch schwierig, ein freies Geschwindigkeitsfeld zu erzeugen, das dem geophysikalischen Vorbild genauso ähnelt wie das im Karlsruher Experiment.

Ein von Daniel P. Lathrop an der Universität von Maryland in College Park (USA) geplantes Experiment erscheint als besonders viel versprechend. Seine Forschungsgruppe versucht, den Testapparat von Carrigan und Busse in den Abmessungen, den Materialien und den Versuchsparametern so zu modifizieren, dass eine Selbstanregung für ein magnetisches Feld erreicht wird. Zwischen zwei aus Titan gefertigten konzentrischen Kugelschalen befindet sich Natrium als Versuchsflüssigkeit. Die innere Kugelschale wird über die zentrale Achse mit einer Kühlflüssigkeit gekühlt, die äußere über Strahlungsheizer erwärmt. Beide Kugelschalen und die Versuchsflüssigkeit werden mit bis zu hundert Umdrehungen pro Sekunde in rasche Rotation versetzt. Unter diesen Bedingungen bilden sich im Natrium die schon beschriebenen Konvektionswalzen aus.

Wenn diese Versuchsapparatur die notwendigen Bedingungen wie hinreichende thermische Auftriebskräfte und hohe Umdrehungszahlen erreichen kann, käme die Selbsterregung eines Magnetfeldes in dieser Anordnung den realen Bedingungen im Erdinneren sehr nahe. Die nächsten Jahre werden zeigen, ob dies gelingt. ■

Professor Dr. Ing. Ulrich Müller *leitete bis zum April 2000 das Institut für Kern- und Energietechnik des Forschungszentrums Karlsruhe, und er lehrt an der technischen Universität Karlsruhe das Fach Strömungsmechanik.* ***Dr. Ing. Robert Stieglitz*** *ist Projektleiter im Institut für Kern- und Energietechnik des Forschungszentrums Karlsruhe und führt das Karlsruher Geodynamo-Experiment durch.*

Die verborgene Ordnung der Quasikristalle

Sie haben eine Ordnungsstruktur, die über viele Atome hinweg ihre Wirkung zeigt; gleichwohl sind sie keine herkömmlichen Kristalle. Abstrakte mathematische Konstruktionen helfen das Geheimnis der Quasikristalle zu enthüllen.

Von Michael Baake, Uwe Grimm und Robert V. Moody

Schickt man parallele Röntgenstrahlen durch einen Kristall, so ergeben sich schön anzusehende, symmetrische, aus lauter Punkten zusammengesetzte Beugungsbilder. Diese Punktmuster erlauben weit gehende Rückschlüsse auf die Struktur des durchstrahlten Objekts (Kasten Seite 66): Ein Kristall ist periodisch, das heißt, man kann ihn sich aus so genannten Elementarzellen zusammengesetzt denken, Gruppen von wenigen Atomen, die sich über den gesamten Kristall hinweg wiederholen wie Ziegelsteine in einem Mauerwerk. Genauer: Ein Kristall geht durch Translationen um jeden von drei unabhängigen Vektoren (die „Kanten des Ziegelsteins") wieder in sich selbst über.

Manchmal sehen die Beugungsbilder sogar so kristallähnlich aus, dass man auf den ersten Blick meinen könnte, sie spiegelten direkt die Atompositionen im Kristallgitter wider. Sie geben jedoch die Symmetrie eines anderen Gitters wieder, die des dualen (oder reziproken) Gitters.

Fast achtzig Jahre lang glaubte man, das Vorkommen scharfer, punktförmiger Reflexe im Beugungsbild sei auf (gewöhnliche) Kristalle beschränkt; entsprechend galten Translationssymmetrie, Kristallstruktur und rein punktförmige Beugungsreflexe als drei verschiedene Ausdrücke für dieselbe Sache. Es war daher für die Kristallographie ein Schock, als 1982 Materialien entdeckt wurden, deren Beugungsbilder zwar nur punktförmige Beugungsreflexe – wie eben bei den üblichen periodischen Kristallen – zeigen, aber eine fünfzählige Drehsymmetrie aufweisen, die mit einer Gittersymmetrie nicht vereinbar ist! Diese neuen Stoffe, die ganz sicher keine herkömmlichen Kristalle waren, wurden „Quasikristalle" getauft (SdW 10/1986, S. 74, und 6/1991, S. 48). Alsbald suchten die Forscher nach ihren physikalischen Eigenschaften und nach mathematischen Modellen, die ihre Geometrie erklären konnten.

In diesem Artikel beschäftigen wir uns mit mathematischen Fragen, die sich aus dieser Entdeckung ergeben. Quasikristalle sind offensichtlich geordnet – sonst hätten sie keine punktförmigen Beugungsreflexe –, aber im Allgemeinen nicht periodisch. Wie kann es aperiodische Ordnung geben, wie kann man sie ausfindig machen und quantifizieren, und wie konstruiert man geordnete aperiodische Muster? Welchen Platz nehmen die Quasikristalle und ihre geometrischen Modelle zwischen der perfekten Ordnung der idealen Kristalle und der weit gehenden Unordnung der amorphen Stoffe ein? Wie können wir den Grad ihrer „Unordnung" charakterisieren?

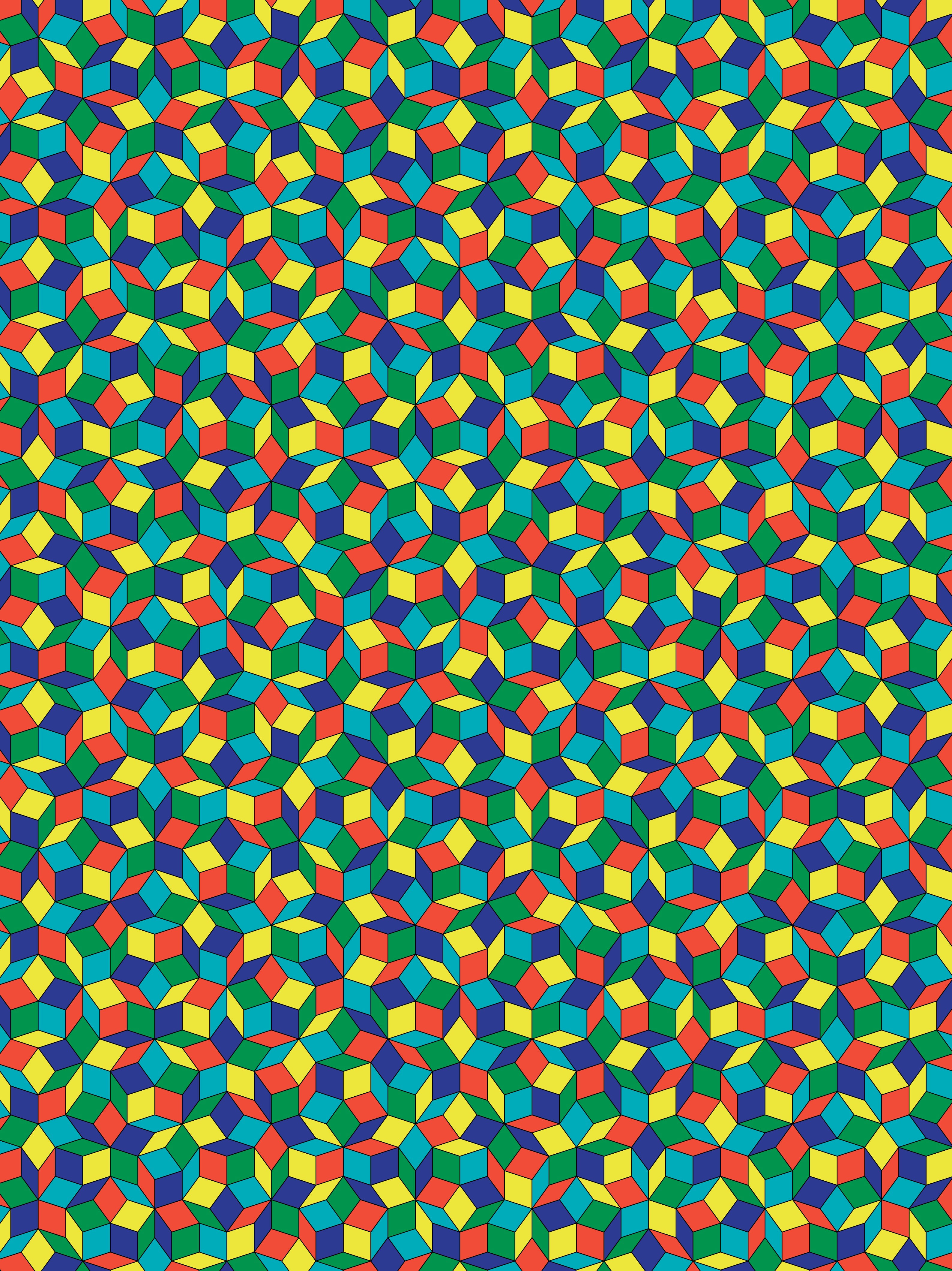
Eine Dimension weniger: ebene Parkette

Für den Einstieg ist es hilfreich, Quasikristalle in zwei statt in drei Dimensionen zu betrachten. Das sind nicht-periodische, aber in gewisser Art regelmäßige Anordnungen von Atomen in einer Ebene. Man findet sie sogar in der Realität: Viele solcher ebenen Anordnungen aufeinander gestapelt ergeben einen Quasikristall, der aperiodisch in zwei Dimensionen und periodisch in der dritten ist. Hier soll es jedoch um die mathematische Idealisierung gehen, die zahlreiche theoretische Ergebnisse liefert.

Man verbinde in Gedanken die Atome durch Striche mit ihren nächsten Nachbarn; dadurch erhält man eine Aufteilung der Ebene in Vielecke. Solche Aufteilungen haben die Mathematiker schon vor der Entdeckung der Quasikristalle intensiv studiert. Es geht um Parkettierungen (*tilings*), das sind lückenlose, überlappungsfreie Bedeckungen der Ebene mit bestimmten Figuren, die dann Parkettsteine (*tiles*) heißen. Interessant sind vor allem Parkette, die aus einem begrenzten Sortiment von Steinen, den „Ursteinen" (*proto-tiles*), gelegt sind. Die einfachsten Parkette bestehen aus lauter Exemplaren eines einzigen, parallelogrammförmigen Ursteins, die so langweilig aneinander gelegt sind wie Standard-Badezimmerkacheln. Sie entsprechen den (aufs Zweidimensionale reduzierten) Elementarzellen eines herkömmlichen Kristalls.

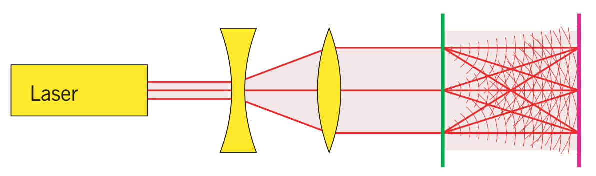
Umgekehrt kann man jedes Parkett als Anordnung von Atomen interpretieren. Wenn die Ursteine Vielecke sind, ▶

Penrose-Parkette aus dicken und dünnen Rauten faszinieren durch ihre Mischung aus Regelhaftigkeit und Unvorhersehbarkeit: Man findet jeden Ausschnitt des Musters an anderer Stelle des Musters wieder, aber es gibt keine periodischen Wiederholungen. Um weitere Strukturen deutlich zu machen, sind die Elemente dieses Musters mit fünf verschiedenen Farben eingefärbt, und zwar so, dass eine Drehung des Bildes um das Zentrum mit einem Vielfachen von 72 Grad einer Permutation der Farben gleichkommt. Das Bild stammt von Max Scheffer von der Technischen Universität Chemnitz.



Beugungsbilder von Kristallen

Der Effekt ist ähnlich der Beugung von Lichtstrahlen am Gitter. Wenn parallele Lichtstrahlen auf ein großes Beugungsgitter treffen, das heißt eine Platte, die sehr viele schmale, parallel und in gleichem Abstand angeordnete transparente Spalte enthält und im Übrigen lichtundurchlässig ist, dann darf man nach dem Huygens'schen Prinzip jeden Spalt als Quelle einer (zylindrischen) Lichtwelle auffassen. Diese Wellen interferieren konstruktiv nur in gewissen Richtungen und löschen sich ansonsten aus. Die hellen Streifen (Beugungsmaxima) auf dem Schirm liegen ebenfalls in gleichen Abständen, und zwar um so weiter auseinander, je dichter die Gitterspalte liegen.





Das Röntgenbeugungsbild eines Kristalls gibt Auskunft über dessen Symmetrien (über die Translationssymmetrie hinaus), in diesem Beispiel eine sechszählige Drehsymmetrie.

Ein unregelmäßiges Gitter würde dagegen nur ein verwaschenes oder gar kein erkennbares Beugungsmuster ergeben. Jeder Punkt des Beugungsmusters gibt also Auskunft über den gesamten ausgeleuchteten Bereichs des Objekts (in diesem Fall des Gitters), und zwar über den Grad der Ordnung in dessen Struktur.

Beleuchtet man nun einen Kristall mit Röntgenstrahlen, so spielen die Atome des Kristalls die Rolle der Gitterspalte. Sie sind zwar in drei Dimensionen periodisch angeordnet statt nur in einer, und die physikalischen Prozesse sind weitaus verwickelter. Gleichwohl gilt: Eine periodische Atomanordnung (sprich ein herkömmlicher Kristall) ergibt ein Beugungsmuster aus lauter Punkten; diese bilden das so genannte duale Gitter zum Kristallgitter.

Aus dem dualen Gitter lässt sich rechnerisch das ursprüngliche Kristallgitter rekonstruieren. Max von Laue (1879–1960), der diesen Effekt 1912 entdeckte und zwei Jahre später dafür den Nobelpreis erhielt, schuf damit eine der wichtigsten Untersuchungsmethoden der Kristallographie.

Insbesondere gibt das Beugungsbild Auskunft darüber, ob der Kristall außer seinen drei Translationssymmetrien über weitere Symmetrien verfügt, zum Beispiel, ob die Anordnung seiner Atome bei einer Rotation um eine bestimmte Achse mit einem bestimmten Winkel wieder in sich übergeht (Bild auf der Briefmarke). Je nach dem Vorhandensein solcher weiterer Symmetrien kann man 230 verschiedene Symmetrieklassen (die so genannten Raumgruppen) unterscheiden. Nach dieser mathematischen Erkenntnis vergingen allerdings noch fast hundert Jahre bis zu dem Nachweis, dass sämtliche Raumgruppen in Kristallen realisiert sind.

setze man zum Beispiel in jede Ecke ein Atom. Man hat jedoch die Freiheit, jeden Urstein an geeigneten Stellen mit Atomen zu besetzen (zu „dekorieren"); für den Physiker sind diejenigen Dekorationen interessant, die zu den Kräften zwischen den Atomen passen.

Eine sehr intensiv studierte Parkettierung hat als Ursteine eine dicke und eine dünne Raute. Man kann mit ihnen periodische und – zumindest halbwegs – ungeordnete Parkette legen (Kasten rechts). Berühmt geworden ist allerdings die so genannte Penrose-Parkettierung, bei der die Freiheit, Steine aneinander zu legen, durch bestimmte Regeln eingeschränkt ist (Bild Seite 65 und Kasten rechts; vergleiche auch Spektrum der Wissenschaft 11/1979, S. 22 und 7/1999, S. 14). Diese Regeln werden zum Beispiel durch Pfeile an den gemeinsamen Kanten ausgedrückt; solche Merkmale, welche die Einhaltung der Anlegeregeln erzwingen, heißen ebenfalls Dekorationen. Der britische Mathematiker Roger Penrose hat diese Parkettierung in den siebziger Jahren entwickelt; Frühformen finden sich bereits bei Johannes Kepler (1571–1630).

Ein korrekt konstruiertes Penrose-Parkett hat mehrere erstaunliche Eigenschaften, darunter die folgenden:

- Ein vollständiges Penrose-Parkett ist aperiodisch, es besitzt überhaupt keine Translationssymmetrie.
- Setzt man Atome in die Eckpunkte der Steine, so ist diese Atomanordnung rein punktstreuend, das heißt, in ihrem Beugungsbild kommen nur scharfe Reflexe vor, und zwar mit zehnzähliger Drehsymmetrie.

Eine andere aperiodische Parkettierung stammt von Robert Ammann, einem Postbeamten und mathematischen Autodidakten, und Frans P. M. Beenker. Sie ist aus zwei einfachen Ursteinen aufgebaut: einem Quadrat und einer Raute (Kasten Seite 68/69). Wie bei der Penrose-Parkettierung ergibt sich bei der Beugung an den Eckpunkten reine Punktstreuung, allerdings diesmal mit achtzähliger Symmetrie.

Inflation und Deflation: Aus eins mach viele

Das Geheimnis vieler besonders interessanter Parkettierungen enthüllt sich mit einem sehr mächtigen Konzept. Es heißt „Inflation", und gemeint ist der ursprüngliche Sinn des Wortes, nämlich „Aufblasen". Die Umkehrung der Inflation wird „Deflation" genannt. Im Prinzip ist das Konzept der Inflation für alle Parkettierungen, auf die es überhaupt anwendbar ist, dasselbe; in den Einzelheiten gibt es Unterschiede. Die folgende Darstellung trifft auf das Ammann-Beenker-Parkett genau und auf andere Parkette mit leichten Modifikationen zu.

Inflation besteht zunächst darin, dass man sämtliche Steine eines Parketts mit einem gewissen Faktor vergrößert. Das ist noch nicht bemerkenswert; aber die Ursteine unserer Parkette haben eine spezielle Eigenschaft: Man kann ihre vergrößerten Versionen in Ursteine der ursprünglichen Größe zerlegen, und zwar so, dass die neuen Steine, geeignet dekoriert, die Anlegeregeln wieder erfüllen, wenn das auch für die unzerlegten Steine gilt.

Man nehme nun ein beliebig kleines Stück eines solchen Parketts, zum Beispiel einen einzelnen Stein, wende auf ihn die Inflation an, auf das Ergebnis wieder, und so weiter. Bei jedem Inflationsschritt vergrößert sich die Fläche, die das Muster bedeckt. So erhält man eine unendliche Folge von regelgerechten Mustern, die immer größere Teile der Ebene ausfüllen (Kasten Seite 68/69).

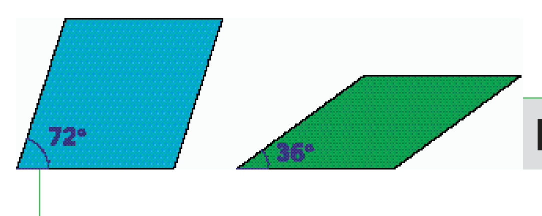
Es ist auf diese Weise sogar ein Muster konstruierbar, das die ganze unendli-

che Ebene bedeckt, dank einer zusätzlichen Eigenschaft: Nach jeweils zwei Inflationsschritten ist das Muster nicht nur größer geworden, sondern enthält auch das ursprüngliche Muster als Teilmuster. Nehmen wir einen beliebigen Punkt der Ebene. Nach einer gewissen Anzahl von Inflationsschritten ist das Muster so groß geworden, dass es diesen Punkt bedeckt. Zwei Muster später liegt wegen der Teilmustereigenschaft wieder derselbe Stein auf dem Punkt, und so weiter bis in alle Ewigkeit. Mathematisch ausgedrückt: Die Folge, die aus jedem zweiten Muster der Inflationsfolge besteht, strebt an jedem Punkt der Ebene gegen einen wohldefinierten Grenzwert (der Stein bleibt einfach derselbe). Der Grenzwert dieser Musterfolge ist das unendliche Muster.

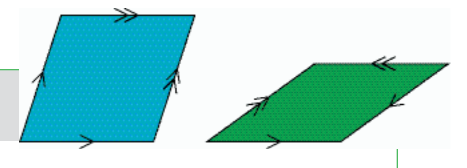
Wenn man auf dieses unendliche Muster die doppelte Inflation anwendet, bleibt es unverändert; so ist es ja konstruiert. Man nennt es einen Fixpunkt („festen Punkt") der doppelten Inflation.

Die so erhaltene Parkettierung der Ebene hat eine weitere erstaunliche Eigenschaft: Ein beliebiger Ausschnitt des Parketts kommt unendlich oft wieder vor. Wir können sogar eine maximale Entfernung angeben, bis zu der wir höchstens suchen müssen, um diesen Ausschnitt wieder zu finden. Ein Muster mit dieser Eigenschaft nennt man repetitiv. Ein perfekter Kristall ist ein Beispiel für eine repetitive Struktur, aber durch die Inflationsvorschrift gewinnen wir nun neue, interessante Fälle.

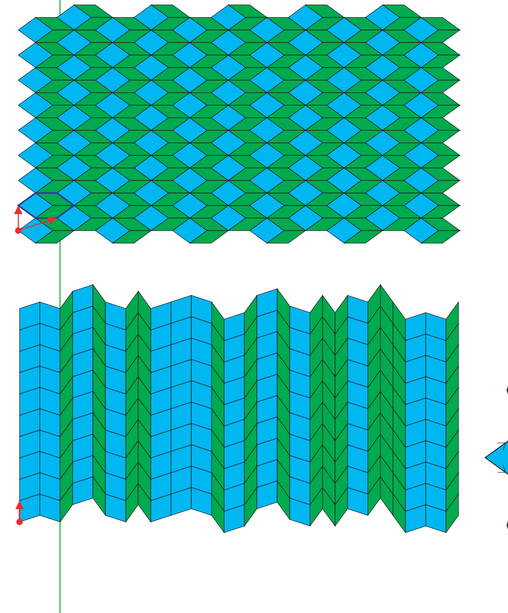
Wie kommt es zur Repetitivität? Nehmen wir zunächst den Fall, dass der Ausschnitt ein einziger Stein ist. Nach zwei Inflationsschritten findet man diesen Stein in mehreren Exemplaren mit gleicher Orientierung und Dekoration wieder. Das kann man am oktagonalen Ammann-Beenker-Parkett direkt nachprüfen (Kas- ▶

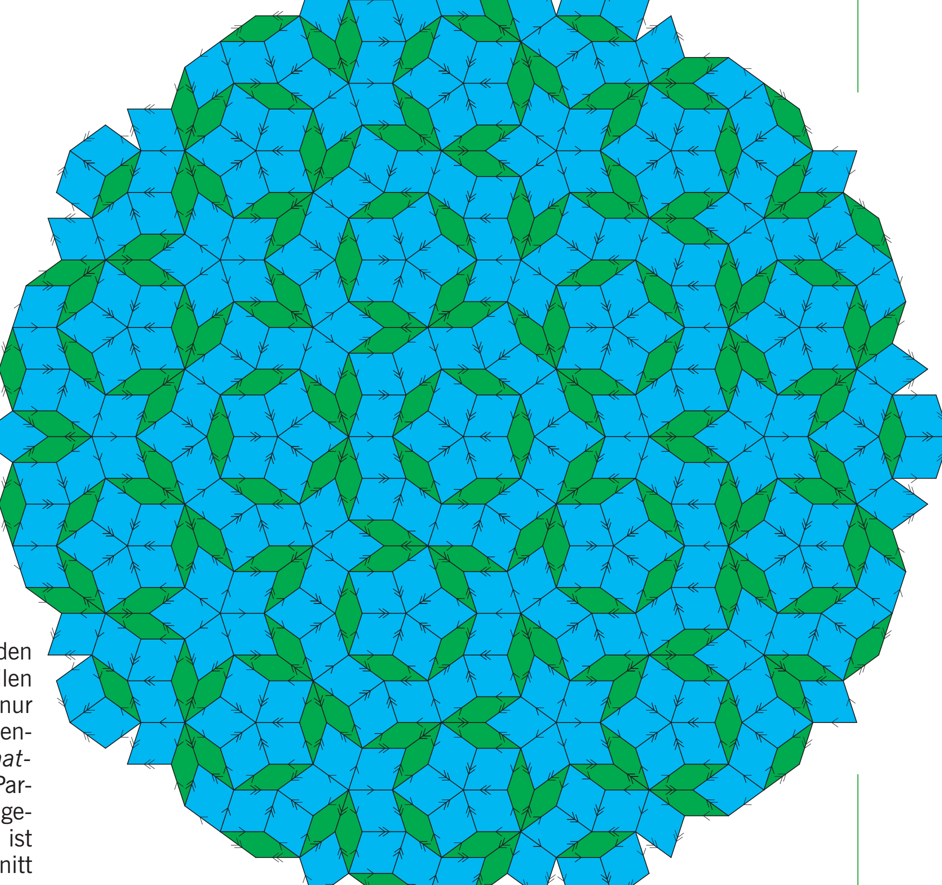


Die Penrose-Parkettierung



Die Ursteine sind zwei Rauten, eine dicke mit dem Öffnungswinkel 72 Grad und eine dünne mit 36 Grad. Sie erlauben periodische Anordnungen (unten): Die Einheitszelle ist das dick umrandete Sechseck, die Gittervektoren sind durch Pfeile dargestellt. Man kann mit diesen Steinen die Ebene jedoch auch sehr ungeordnet füllen, beispielsweise indem man in horizontaler Richtung einen völlig willkürlichen „Rautenwurm" legt und das Muster in vertikaler Richtung durch weitere Exemplare dieses Wurms periodisch fortsetzt (links, ganz unten).





Man versehe nun die Kanten der beiden Rauten mit Einfach- und Doppelpfeilen („Dekoration", rechts oben) und erlaube nur noch Anordnungen mit zusammenpassenden Pfeilen. Unter dieser Anlegeregel (*matching rule*) sind die einzigen erlaubten Parkettierungen der gesamten Ebene die so genannten Penrose-Parkettierungen. Daraus ist hier ein fünfzählig symmetrischer Ausschnitt gezeigt.

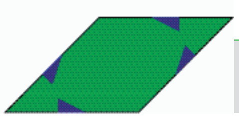
ten unten); beim Penrose-Parkett braucht man, genau genommen, vier statt zwei Inflationsschritte und muss dann einen Stern aus fünf dicken Rauten ins Zentrum legen. Mit jedem weiteren – doppelten beziehungsweise vierfachen – Inflationsschritt vervielfacht sich die Anzahl dieser gleichen und gleich orientierten Steine und wächst damit über alle Grenzen.

Für größere Ausschnitte kommt die Umkehrung der Inflation ins Spiel. Eine doppelte (beziehungsweise vierfache) Deflation ändert am gesamten (unendlich großen) Muster nichts, ebenso wenig wie die gleiche Anzahl an Inflationen; das ist gerade die Fixpunkteigenschaft. Jeden beliebigen Ausschnitt endlicher Größe kann man durch wiederholtes Anwenden der mehrfachen Deflation so lange kleiner machen, bis er gänzlich in einem Stein enthalten ist. Von diesem Stein gibt es, wie wir oben gesehen haben, unendlich viele weitere Exemplare in gleicher Orientierung. Diese halte man im Auge, wende nun auf das Muster so viele Inflationen an, wie man zuvor Deflationen anwenden musste, und verfolge das Schicksal dieser ausgewählten Steine. Sie werden sämtlich zu Mustern, die den ursprünglichen Ausschnitt enthalten. Also kommt dieser Ausschnitt in unendlich vielen Ausfertigungen vor.

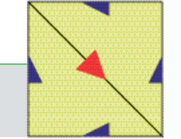
Repetitivität: Wiederholung ohne Periode

Unser unendliches Muster hat also eine seltsame und scheinbar paradoxe Eigenschaft: Es ist repetitiv auf allen Skalen – einerlei wie groß diese sind –, kann sich aber nicht periodisch wiederholen! Das sieht man wiederum mit einem Deflationsargument: Angenommen, es gäbe einen – möglicherweise sehr großen – Ausschnitt des Musters, der sich periodisch wiederholt. Dann mache man diesen durch Deflation so lange kleiner, bis er in einen einzigen Stein passt. Damit hätte man ein Muster gewonnen, in dem viele Exemplare ein und desselben Steins periodisch unmittelbar aneinander liegen. Das aber ist unmöglich; das verbieten bereits die Anlegeregeln. Also kann das Muster nicht periodisch sein.

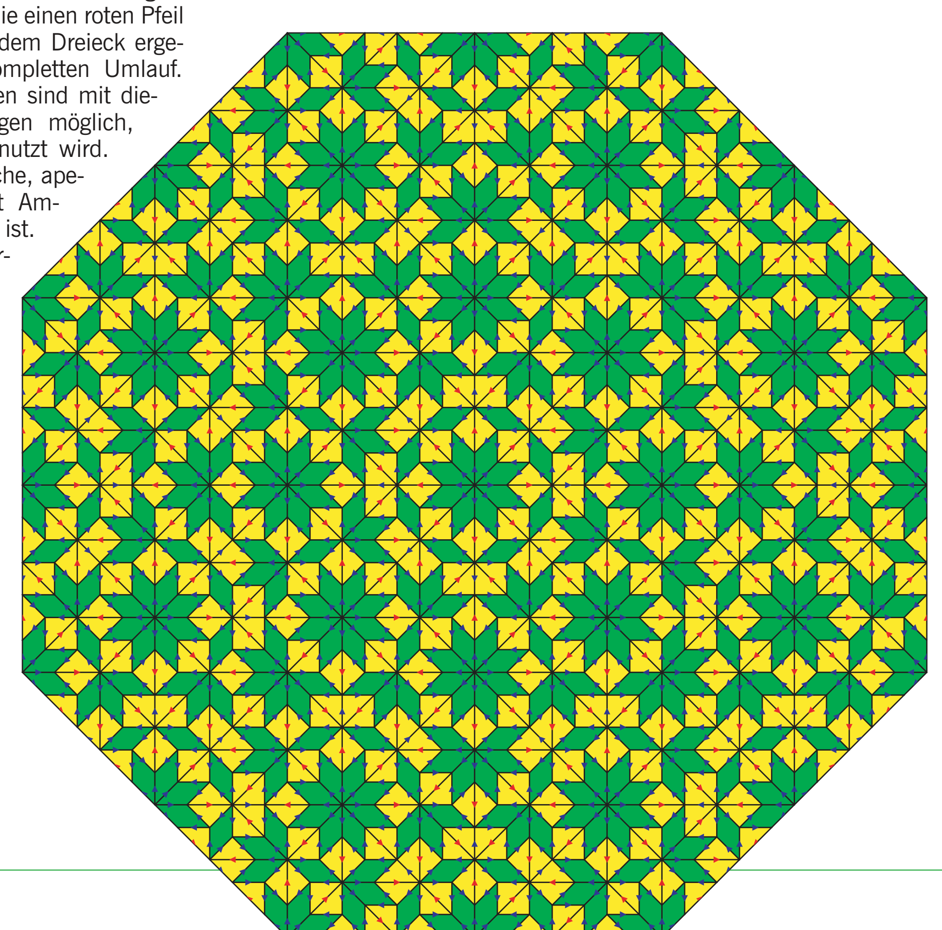
Aus dieser Tatsache folgt eine weitere verblüffende Eigenschaft: Steht man irgendwo auf dem Parkett und betrachtet seine Umgebung, so kann man nicht wissen, wo auf dem Parkett man sich gerade befindet. Man kann auch aus der Betrachtung eines endlichen Stücks Parkett nicht entnehmen, wie es fortzusetzen ist, sodass sich das unendliche Parkett ergibt. Nehmen wir an, es gäbe eine solche eindeutige Fortsetzungsvorschrift. Denkbar wäre ja, dass man unter Beachtung der Anlegeregeln und vielleicht weiterer Vorschriften einfach Steine zu dem bisherigen Stück hinzufügt. Aber



Die oktagonale Parkettierung von Ammann und Beenker



Die Ursteine sind ein Quadrat und eine Raute mit dem Öffnungswinkel 45 Grad, die mit blauen Pfeilen auf ihren Kanten versehen sind. Das Quadrat ist noch in zwei kongruente gleichschenklige Dreiecke aufgeteilt, die einen roten Pfeil an ihrer gemeinsamen Basis tragen. In jedem Dreieck ergeben die Richtungen der Pfeile einen kompletten Umlauf. Anders als bei den Penrose-Parkettierungen sind mit diesen Pfeilen auch periodische Anordnungen möglich, zum Beispiel indem nur das Quadrat benutzt wird. Hier gezeigt ist eine achtzählig symmetrische, aperiodische Parkettierung, die nach Robert Ammann und Frans P. M. Beenker benannt ist. Deren Beugungsbild besteht aus punktförmigen Reflexen. Diese Punkte sind durch Kreise dargestellt (unten), deren Fläche proportional zur Intensität der Reflexe ist. Reflexe mit einer Intensität unterhalb von 0,05 Prozent der Intensität des Zentralreflexes sind nicht dargestellt.



dann würden zwei Leute, die an verschiedenen Stellen des Parketts auf gleichen Ausschnitten stehen, diese in gleicher Weise ergänzen. Also würde das Parkett durch Translation von dem einen Ausschnitt auf den anderen in sich übergehen. Dann aber wäre es periodisch, was nicht sein kann.

Andererseits gilt: Wenn ein unendliches Parkett – aus Penrose-Rauten oder aus Ammann-Beenker-Steinen – an jeder Stelle die Anlegeregeln erfüllt, dann ist es bereits ein perfektes Parkett. Das bedeutet zwar nicht, dass es ein Fixpunkt der doppelten Inflation wäre; aber es ist einem solchen zum Verwechseln ähnlich, präzise ausgedrückt: durch Betrachten eines (beliebig großen) endlichen Ausschnitts nicht von ihm unterscheidbar.

Wieso kann man dann nicht durch vorschriftsmäßiges Anlegen aus einem endlichen Muster eines gewinnen, das die ganze Ebene bedeckt? Weil man bei dieser Anlegeoperation stecken bleiben kann. Es gibt dann unter Umständen keine Möglichkeit, noch überhaupt einen Stein vorschriftsmäßig anzulegen. Um diesen Sackgassen zu entgehen, muss man jedoch das gesamte Parkett kennen, und dazu reicht lokale Information nicht aus.

Noch eine Dimension weniger: Parkette auf einer Linie

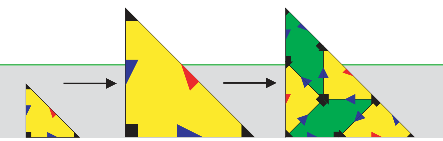
In Anbetracht dieser Schwierigkeiten hält man Ausschau nach anderen Methoden, große fehlerfreie Parkettausschnitte zu konstruieren. Zum besseren Verständnis einer solchen Methode gehen wir nochmals eine Dimension abwärts und betrachten eindimensionale Parkettierungen. Deren „Steine“ sind ziemlich langweilig – nichts weiter als Strecken verschiedener Länge, denn mehr gibt es in einer Dimension nicht. Dafür ist ihr Verhalten auch einfacher zu durchschauen.

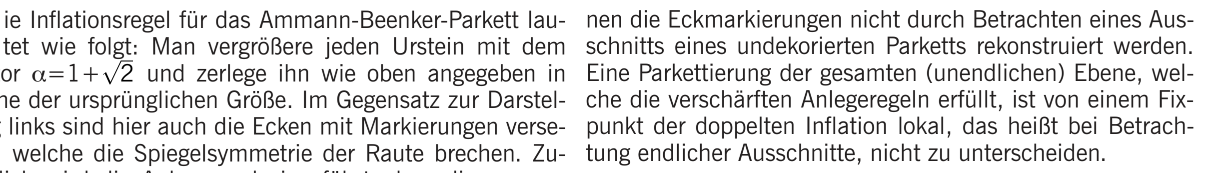
Unsere zwei Ursteine haben die Längen 1 und $\alpha=1+\sqrt{2}$. Wieder kann man eine Inflation definieren und erhält im Grenzwert unendlich vieler Inflationsschritte eine Parkettierung der gesamten Zahlengerade (Kasten Seite 71). Sie wird eindeutig durch die Koordinaten der linken Endpunkte aller Steine beschrieben. Diese bilden eine unendliche Menge $A=\{\ldots, -\alpha-1, -\alpha, 0, \alpha, \alpha+1, 2\alpha+1, \ldots\}$.

Offensichtlich haben die Punkte von A alle die Form $u+v\sqrt{2}$ mit ganzzahligen Koeffizienten u und v. Aber welche Werte von u und v kommen nun vor und welche nicht? Wenn man alle ganzzahligen u und v zuließe, wäre die Zahlengerade dicht mit Punkten besetzt.

An dieser Stelle hilft ein Trick aus der Schulmathematik, Übersicht zu gewinnen: Zusätzlich zu einem Wurzelausdruck betrachtet man denselben Ausdruck mit dem umgekehrten Vorzeichen vor der Wurzel. (Wenn so ein Wurzelaus-





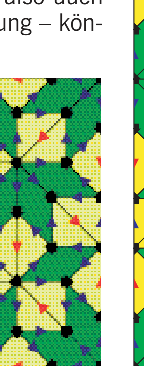


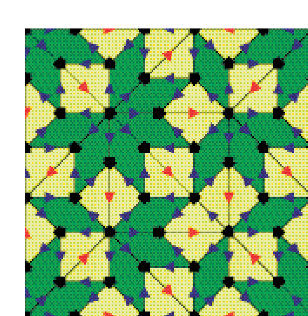
Die Inflationsregel für das Ammann-Beenker-Parkett lautet wie folgt: Man vergrößere jeden Urstein mit dem Faktor $\alpha=1+\sqrt{2}$ und zerlege ihn wie oben angegeben in Steine der ursprünglichen Größe. Im Gegensatz zur Darstellung links sind hier auch die Ecken mit Markierungen versehen, welche die Spiegelsymmetrie der Raute brechen. Zusätzlich wird die Anlegeregel eingeführt, dass die Eckmarkierungen stets ein vollständiges „Haus“ ergeben müssen.

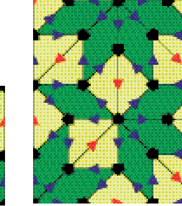
Die Bildsequenz unten zeigt die Zwischenergebnisse beim dreimaligen Ausführen der Inflationsregel, beginnend mit einem Quadrat. Jedes Bild enthält in der Mitte eine um 180 Grad gedrehte Version seines unmittelbaren Vorgängers und daher auch seinen Vorvorgänger in der ursprünglichen Orientierung.

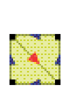
Das achteckige Muster links erhält man, indem man die Inflationsregel zweimal auf das zentrale Achteck (aus acht Quadraten und sechzehn Rauten) anwendet und die Eckmarkierungen weglässt.

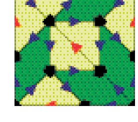
Anders als die Kantenmarkierungen – also auch anders als im Fall der Penrose-Parkettierung – können die Eckmarkierungen nicht durch Betrachten eines Ausschnitts eines undekorierten Parketts rekonstruiert werden. Eine Parkettierung der gesamten (unendlichen) Ebene, welche die verschärften Anlegeregeln erfüllt, ist von einem Fixpunkt der doppelten Inflation lokal, das heißt bei Betrachtung endlicher Ausschnitte, nicht zu unterscheiden.





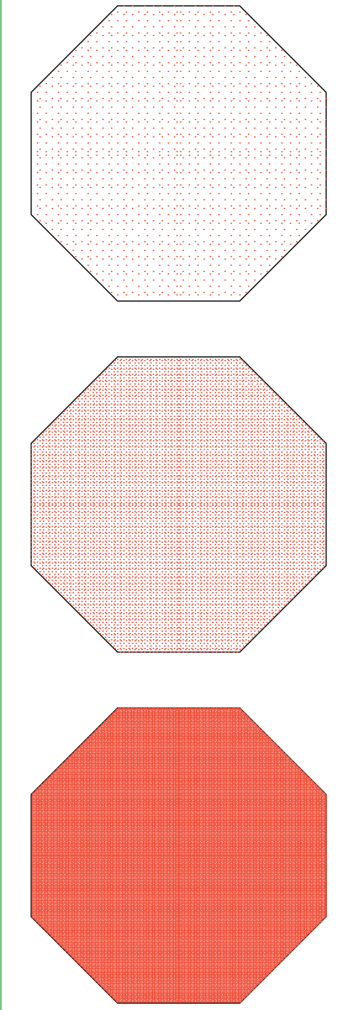




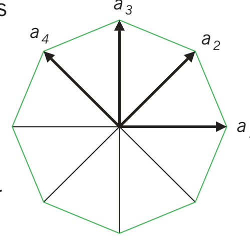


druck im Nenner eines Bruches steht, erweitert man mit dem Ausdruck mit umgekehrtem Vorzeichen, wodurch der Nenner rational wird.) Nach diesem Rezept definieren wir zu jedem Punkt $x=u+v\sqrt{2}$ den „konjugierten Punkt" $x^*=u-v\sqrt{2}$. Außerdem entzerren wir das ganze Bild: Wir setzen unsere Punkte nicht auf die Gerade, wo es in der Tat sehr eng wird, sondern in die Ebene. Unsere ursprüngliche Gerade wird die *x*-Achse dieser Ebene. Anstelle des Punktes *x* der Geraden zeichnen wir den Punkt (x, x^*) der Ebene (Kasten rechts).

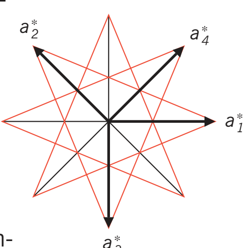
Die Streifenprojektionsmethode für die Ammann-Beenker-Parkettierung



Das oktagonale Ammann-Beenker-Parkett besteht aus Quadraten und 45-Grad-Rauten einheitlicher Kantenlänge, die wir gleich 1 setzen. Von einem Eckpunkt des Parketts kommt man zu einem benachbarten, indem man einen der Vektoren a_1 bis a_4 entlang läuft (rechts), oder einen der Vektoren $-a_1$ bis $-a_4$, das heißt in Gegenrichtung. Im ganzen Parkett kommen nur diese vier Richtungen vor: horizontal, vertikal sowie mit 45 Grad nach links oder rechts steigend.



Der Ursprung unseres Koordinatensystems sei ein Eckpunkt des Parketts. Zu irgendeinem anderen Eckpunkt gelangt man, indem man in Richtung jedes Einheitsvektors a_1 bis a_4 (oder in Gegenrichtung) eine gewisse Anzahl von Schritten geht. Jeder Eckpunkt ist also eine Linearkombination $u_1a_1+u_2a_2+u_3a_3+u_4a_4$ mit ganzzahligen Koeffizienten u_1, u_2, u_3, u_4. Aber nicht jede dieser Linearkombinationen ist Eckpunkt des Parketts!



Die Auswahl der „richtigen" Linearkombination findet wieder über eine Konjugation statt: Zu dem Punkt $x=u_1a_1+u_2a_2+u_3a_3+u_4a_4$ definieren wir $x^*=u_1a_1^*+u_2a_2^*+u_3a_3^*+u_4a_4^*$. Dabei sind die Einheitsvektoren a_1^* bis a_4^* wie in dem „Stern" rechts oben definiert. (Für Freunde der komplexen Analysis: a_1 bis a_4 sind achte Einheitswurzeln, und a_1^* bis a_4^* deren dritte Potenzen.) Auch hier bilden die Paare (x,x^*) ein Gitter, diesmal in vier Dimensionen.

Die Eckpunkte des Ammann-Beenker-Parketts sind nun die Punkte *x* mit der Eigenschaft, dass x^* innerhalb eines regelmäßigen Achtecks liegt. Zu den Eckpunkten der Bilder aus dem Kasten Seite 69 fallen die Konjugierten wie Schneeflocken in dieses achteckige Fenster (links). Mit jedem Inflationsschritt wird die Schneedecke dichter und bedeckt im Grenzwert das Achteck gleichmäßig.

Dadurch klärt sich das Bild: Alle Punkte der Form $(u+v\sqrt{2}, u-v\sqrt{2})$, wobei *u*, *v* ganze Zahlen sind, ergeben ein Gitter (einen zweidimensionalen mathematischen Kristall). Die Punkte, die den Punkten unserer Menge *A* entsprechen, liegen alle in einem horizontalen Streifen. Indem man die zweite Koordinate dieser Punkte weglässt, das heißt sie auf die horizontzale Achse projiziert, erhält man genau die Punkte unseres Parketts, also die Menge *A*.

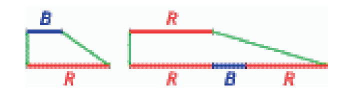
Es ist nun sehr einfach, die linken Endpunkte der eindimensionalen Parkettsteine und damit das gesamte Parkett zu berechnen. Man erzeugt auf einem Computer systematisch Punkte der Form $u+v\sqrt{2}$ (und zwar mit einem geschickten Verfahren nur solche, auf die es ankommt). Zu jedem dieser Punkte testet man, ob der konjugierte Punkt $u-v\sqrt{2}$ im Streifen liegt. Wenn das der Fall ist, nimmt man diesen Punkt in die Liste der Parkettpunkte (die Computerversion der Menge *A*) auf. Durch genauere Analyse kann man bestimmen, ob er linker Randpunkt eines kurzen oder eines langen Steins ist.

Streifenprojektion

Diese Konstruktion liefert uns einen bemerkenswerten Zusammenhang zwischen einer algebraischen Berechnungsvorschrift für das Parkett und seiner Geometrie. Allgemein besteht das Verfahren darin, aus einem Gitter einen Streifen auszuschneiden (*cut*) und die in diesem Streifen liegenden Punkte zu projizieren (*project*). Die dadurch entstehende Punktmenge nennt man eine „Streifenprojektionsmenge" (*cut and project set*). Der Streifen wiederum besteht in unserem Beispiel aus allen Punkten, deren *y*-Koordinate in einem gewissen Intervall der *y*-Achse liegt (hellblau im Kasten oben). Dieser Teil der *y*-Achse (der im Allgemeinen nicht unbedingt ein Intervall sein muss) heißt „Fenster" der Projektionsmethode. Das Verfahren geht in der Physik auf Peter Kramer aus Tübingen zurück; in der Mathematik gibt es mehrere Vorläufer.

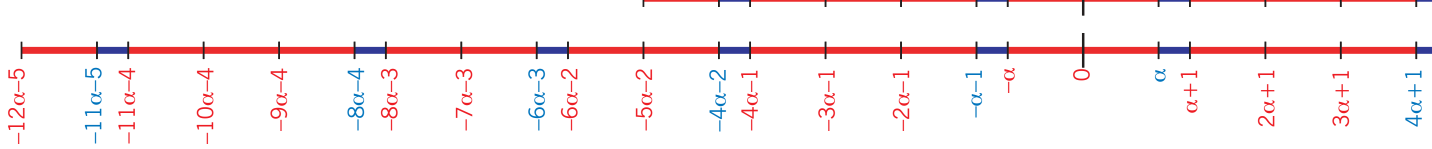
Aus der Konstruktion geht unmittelbar hervor, dass die Menge *A* aperiodisch sein muss. Nehmen wir an, sie wäre periodisch, es gäbe also eine Verschiebung *t* (nach links oder rechts), welche die Menge auf sich selbst abbildet. Dann müsste *t* von der Form $r+s\sqrt{2}$ sein – schließlich besitzen alle Punkte von *A* diese Form. Jeder Punkt *x* der Menge *A* würde also in $x+t$ übergehen; dieser Punkt müsste wieder in *A* enthalten sein, also läge $(x+t)^*=x^*+t^*=x^*+r-s\sqrt{2}$ ▶

Eindimensionale Quasikristalle

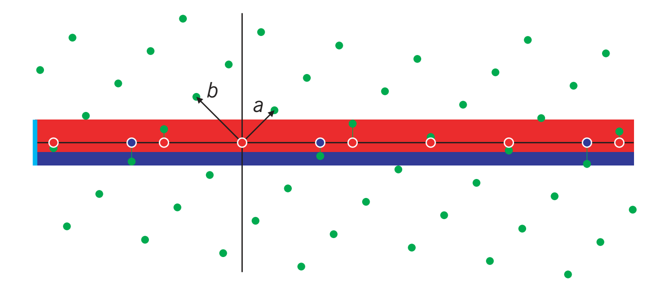


Wir beginnen mit zwei Ursteinen: Der kurze Stein *B* (blau) hat die Länge 1 und der lange *R* (rot) die Länge $\alpha=1+\sqrt{2}$ (diese Zahl kennen wir schon von der oktagonalen Parkettierung). Inflation bedeutet hier, dass die Steine mit dem Faktor α gestreckt werden; dabei wird ein *B*-Stein zu einem *R*-Stein, und der *R*-Stein wird zerlegt in *R*, *B*, *R*; denn $\alpha\times\alpha=2\alpha+1$. Aus einem Paar *R*-Steine, das beiderseits des Nullpunkts auf der Zahlengeraden liegt, wird in drei Inflationsschritten nacheinander eine lange Stange (Bildfolge rechts).

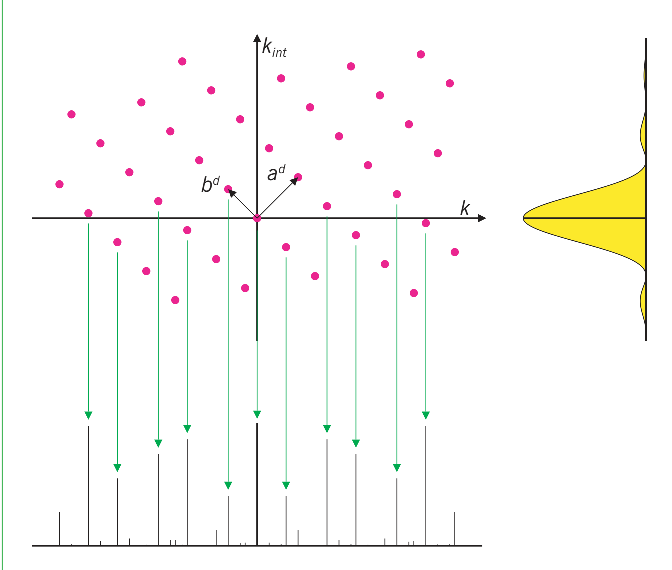
Wieder erhalten wir im Grenzwert unendlich vieler Inflationsschritte eine vollständige Überdeckung, diesmal nicht der Ebene, aber immerhin der Zahlengeraden; denn das Parkett, das nach jedem Inflationsschritt entsteht, enthält das Ergebnis des vorigen Inflationsschritts als Teilmenge in seiner Mitte. Wir schreiben an jeden Stein die Koordinate seines linken Endpunkts und erhalten eine unendliche Menge von Zahlen der Form $u+v\sqrt{2}$ mit ganzzahligen Koeffizienten *u* und *v*. Wie kann man diese Menge charakterisieren?



Eine Möglichkeit ist die Streifenprojektionsmethode: Die grünen Punkte bilden das Gitter $\{(u+v\sqrt{2}, u-v\sqrt{2})\mid u, v \text{ ganzzahlig}\}$, das von den Basisvektoren *a* und *b* aufgespannt wird. Der Streifen (rot und blau) reicht von der Höhe $-1/\sqrt{2}$ bis $1/\sqrt{2}$. Er ist bezüglich des Gitters irrational orientiert: In dem Koordinatensystem, dessen Achsen in den Richtungen *a* und *b* liegen, hat die schwarze Linie (die ursprüngliche *x*-Achse) eine irrationale Steigung. Daher geht sie durch den Ursprung, aber durch keinen anderen Gitterpunkt. Die grünen Punkte innerhalb des Streifens werden senkrecht auf die horizontale schwarze Linie projiziert und entsprechend ihrer vertikalen Position im Streifen eingefärbt. Dadurch erhält man eine Punktmenge aus roten und blauen Punkten, die mit der oben durch Inflation erhaltenen übereinstimmt. Die blauen Punkte kommen aus dem unteren Teil dieses Streifens, nämlich von $-1/\sqrt{2}$ bis $1/\sqrt{2}-1$, während die roten Punkte aus dem restlichen Teil stammen.



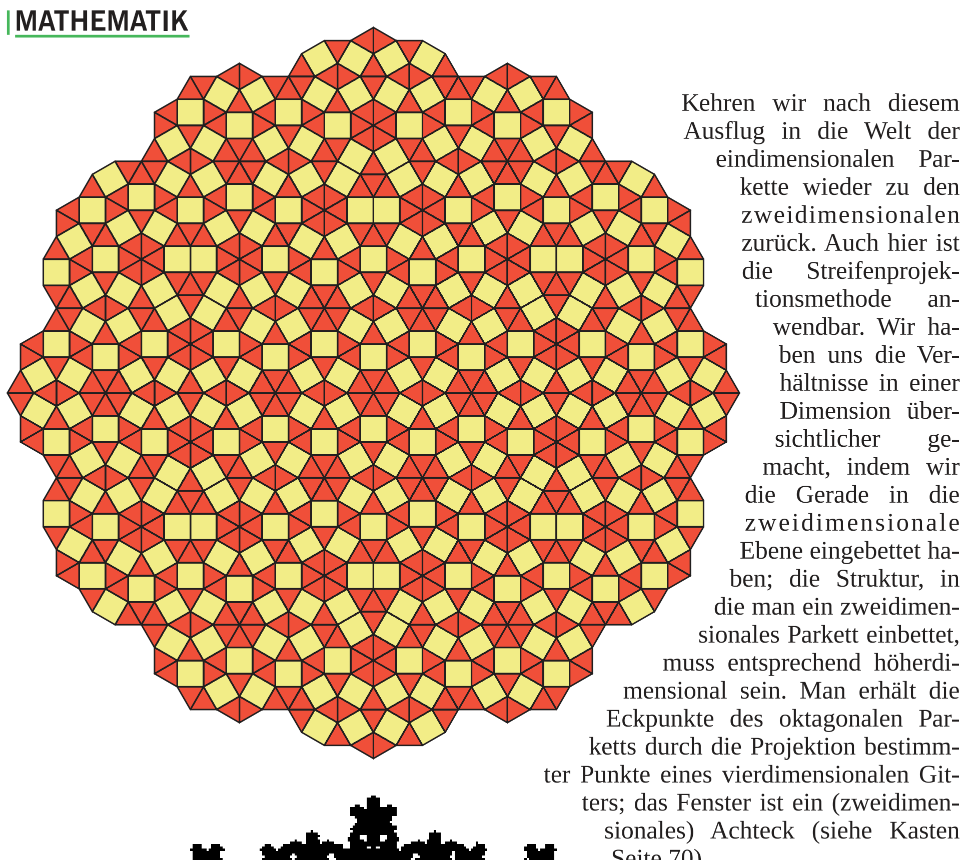
Der Blick von der „höheren Warte" des zweidimensionalen Gitters verhilft auch zu einem besseren Verständnis dessen, was den Quasikristall zum Quasikristall macht: des punktförmigen Beugungsbildes. Man gehe zum dualen Gitter über. Dieses besteht in unserem Fall aus den violett gezeichneten Punkten $(m/2+n\sqrt{2}/4, m/2-n\sqrt{2}/4)$ für ganzzahlige *m* und *n* (Bild links). Die Basisvektoren a^d und b^d des dualen Gitters stehen zu den Basisvektoren *a* und *b* des ursprünglichen Gitters in der Beziehung $a^d\bullet a = b^d\bullet b = 1$ und $a^d\bullet b = b^d\bullet a = 0$ (Skalarprodukt).



Das Beugungsbild ist eine Art „Schatten" des dualen Gitters: Alle Punkte des dualen Gitters werden auf die horizontale Linie unten projiziert, die damit dicht bedeckt wird: In beliebiger Nähe jedes Punktes der Geraden befindet sich das projizierte Bild eines Gitterpunktes. An jedem dieser Punkte befindet sich ein Beugungsreflex.

Anstatt diskreter Leuchtpunkte würde man also eine mit Leuchtpunkten dicht gefüllte Gerade sehen. Das sähe einem kontinuierlichen Beugungsbild zum Verwechseln ähnlich – wenn nicht die Beugungsreflexe sehr unterschiedlich hell wären. Diese Helligkeit (Intensität) ist durch die vertikalen Striche angegeben (Bild links). Das Muster dieser Striche gleicht einem stark abgenutzten Kamm: Einzelne Zinken haben noch (fast) ihre ursprüngliche Länge, aber die allermeisten sind bis auf kleine Stummel abgebrochen. Ein Punkt des dualen Gitters im Abstand *y* von der horizontalen Achse (in einer geeigneten Skala gemessen) liefert einen Beugungsreflex der Intensität $(\sin(y)/y)^2$ (Kurve rechts im Bild). Fachleute erkennen in dieser Funktion die (quadrierte) Fouriertransformierte der charakteristischen Funktion des Intervalls, das in diesem Fall das Fenster ist.

Streng genommen besteht das Beugungsbild also nicht aus voneinander isolierten Punkten – aber es sieht ganz so aus, einerlei wie genau man hinschaut.



Diese quasiperiodische Parkettierung aus Quadraten und Dreiecken (oben) kann man entweder durch Anwenden einer Inflationsregel oder durch Projektion aus einem vierdimensionalen Gitter erhalten. Das Fenster (unten), das für die Auswahl der zu projizierenden Punkte verwendet wird, ist zwölfzählig symmetrisch und hat einen fraktalen Rand.

wieder im Fenster. Das gesamte Fenster müsste also beim Verschieben um $r-s\sqrt{2}$ in sich übergehen! Das ist jedoch unmöglich, außer wenn $r-s\sqrt{2}=0$, also $r=s\sqrt{2}$ ist. Nun ist $\sqrt{2}$ irrational, s und r sind jedoch ganze Zahlen, deshalb ist die einzig mögliche Lösung $r=s=0$.

Kehren wir nach diesem Ausflug in die Welt der eindimensionalen Parkette wieder zu den zweidimensionalen zurück. Auch hier ist die Streifenprojektionsmethode anwendbar. Wir haben uns die Verhältnisse in einer Dimension übersichtlicher gemacht, indem wir die Gerade in die zweidimensionale Ebene eingebettet haben; die Struktur, in die man ein zweidimensionales Parkett einbettet, muss entsprechend höherdimensional sein. Man erhält die Eckpunkte des oktagonalen Parketts durch die Projektion bestimmter Punkte eines vierdimensionalen Gitters; das Fenster ist ein (zweidimensionales) Achteck (siehe Kasten Seite 70).

Hier können wir die Verbindung zur Inflationsmethode herstellen. Die Inflation macht aus einem Ausschnitt des Parketts einen größeren, das heißt, die Eckpunkte werden zahlreicher und ihre Koordinaten größer. Die zu den Eckpunkten gehörigen konjugierten Punkte fallen alle, wie es sein muss, in das achteckige Fenster und füllen es mit jedem Schritt gleichmäßig immer dichter aus (Kasten Seite 70).

Nun ist ein vierdimensionales Gitter nicht gerade das, was man anschaulich nennen würde. Vom mathematischen Standpunkt ist es jedoch weit einfacher als das zweidimensionale Parkett, das man sehen kann. Die dahinter stehenden Konzepte sind sehr mächtig und stellen Verbindungen zwischen Geometrie, Algebra und Analysis her, die für das Verständnis der Quasikristalle von entscheidender Bedeutung sind.

Die Eckpunkte des Penrose-Parketts können ebenso mit der Streifenprojektionsmethode konstruiert werden, wie auch viele andere ähnliche Punktmengen. Dass diese aperiodisch sind, lässt sich auf dieselbe Weise zeigen wie bei unserem eindimensionalen Beispiel.

Eine weitere physikalisch interessante Parkettierung besteht aus Quadraten und gleichseitigen Dreiecken. Sie kann durch eine kompliziertere Inflationsregel oder ebenfalls mit der Streifenprojektionsmethode hergestellt werden. Das entsprechende Fenster zeigt eine neue Eigenschaft: Es ist eine kompakte Menge mit fraktalem Rand (Bild links).

Die Beugungsmuster der Quasikristalle

Die Streifenprojektionsmethode erklärt auch, warum Quasikristalle punktförmige Beugungsreflexe aufweisen. Sie interpretiert nämlich einen (aperiodischen) Quasikristall als den „Schatten" eines höherdimensionalen periodischen Gebildes. Wenn man Licht durch dieses höherdimensionale Gitter schicken würde (was immer das heißen mag), bekäme man wie bei jedem Kristall punktförmige Beugungsbilder. Der zweidimensionale Schatten erbt gewissermaßen von seinem vierdimensionalen Urbild die Eigenschaft, punktstreuend zu sein.

Diese Erklärung ist zwar suggestiv, aber leider nur die halbe Wahrheit. Das Beugungsbild eines Schattens ist nämlich nicht dasselbe wie der Schatten des Beugungsbildes – diese allegorische Aussage lässt sich mathematisch exakt fassen –, und der Schatten vom Streifen eines periodischen Gitters ist im Allgemeinen nicht wieder periodisch. Die genaue Analyse des Sachverhalts erfordert erheblichen mathematischen Aufwand.

Am Ende stellt sich heraus: Das Beugungsbild unseres eindimensionalen Quasikristalls ist zwar punktförmig, aber die Punkte liegen nicht „diskret" wie im periodischen Fall: In jeder beliebig kleinen Umgebung eines Bildpunktes gibt es weitere Bildpunkte. Allerdings ist das Beugungsbild bei Betrachtung mit endlicher, wenn auch beliebig großer Sehschärfe nicht von einem diskreten zu unterscheiden.

Es verhält sich so wie bei der berühmten Frage des Astronomen und Arztes Heinrich Olbers (1758 – 1840): Wieso wird es nachts eigentlich dunkel? An welchen Punkt der Himmelskugel man auch blickt, in seiner unmittelbaren Nähe findet man mit einem hinreichend starken Fernrohr stets einen Stern. Wieso ist der Himmel dann nicht gleichmäßig erleuchtet? Die Antwort ist für Sterne und Beugungsreflexe dieselbe: Die leuchtstärkeren Objekte sind sehr selten und die Helligkeit der übrigen so gering, dass

selbst die Summe der Helligkeiten unendlich vieler Objekte einen endlichen Wert ergibt; und der liegt obendrein meistens – bis auf die wenigen Punkte hoher Intensität – unterhalb der Wahrnehmbarkeitsschwelle.

Ein Parkett für die Logiker

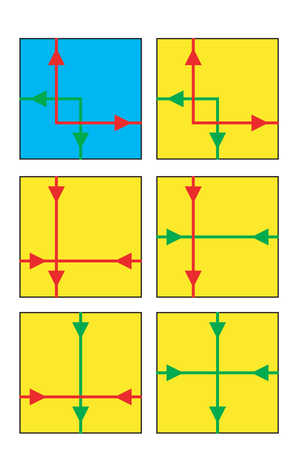
In den angeführten Beispielen leistet die Streifenprojektionsmethode gute Dienste bis hin zu einer Erklärung der punktförmigen Beugungsmuster. Gleichwohl wirkt sie ein wenig wie Hexerei. Zwar haben wir inzwischen herausgefunden, warum wir ausgerechnet durch Umdrehen des Vorzeichens vor der Wurzel so weit kommen und unter welchen Umständen der Trick funktioniert. Aber wir wissen noch nicht, ob es vielleicht aperiodische, repetitive, rein punktstreuende Punktmengen gibt, die nicht mit der Streifenprojektionsmethode gewonnen werden können – auch nicht mit einer Verallgemeinerung. Wir wissen jedoch: Es müssen nicht unbedingt irrationale Zahlen wie $\sqrt{2}$ vorkommen. Ein sehr interessantes und früh entdecktes Beispiel dafür ist die Robinson-Parkettierung.

Die Ersten, die sie intensiv studierten, waren nicht die Geometer oder die Kristallographen, sondern bemerkenswerterweise die Logiker. Sie wollten klären, unter welchen Umständen ein formales Verfahren (ein Algorithmus) eine Frage über unendliche Mengen in endlicher Zeit beantworten kann. Als Beispiel wählten sie die folgende Frage: Gegeben seien endlich viele Ursteine. Kann man mit Steinen aus diesem Sortiment die Ebene lückenlos und überlappungsfrei bedecken – eben parkettieren?

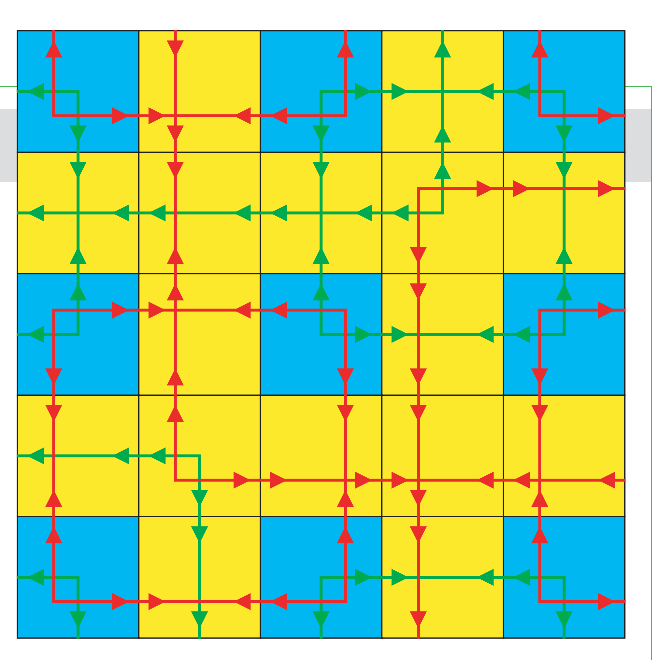
Hao Wang und sein Student Robert Berger haben 1966 bewiesen, dass es einen Algorithmus, der diese Frage entscheidet, nicht geben kann. Kernstück dieser Unentscheidbarkeitsaussage sind Ursteine, die eine periodische Parkettierung nicht zulassen; daraufhin suchten die Forscher intensiv nach dem kleinstmöglichen Ursteinsortiment mit dieser Eigenschaft. Bislang ist die kleinste bekannte Anzahl 2; sie wird zum Beispiel von den dekorierten Penrose-Rauten realisiert. Ob es einen einzigen Urstein gibt, der eine aperiodische Parkettierung der Ebene erzwingt, ist unbekannt.

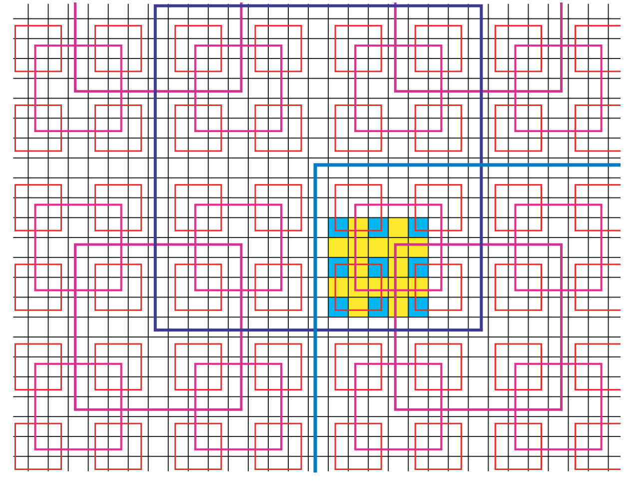
Raphael Robinson bewies 1971 eine Aussage folgender Art: Wenn es einen Algorithmus gäbe, der die Frage der Parkettierbarkeit entscheidet, dann könnte man ihn zu einem Programm umfunktionieren, welches das berühmte „Halteproblem“ entscheidet: Wird eine Turing-Maschine je anhalten, wenn sie einen gegebenen Input bearbeitet (Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 10)? Da bekannt ist, dass es ein solches Programm nicht ▶

Die Robinson-Parkettierung



Die sechs Ursteine (links) sind Quadrate; sie tragen zwei verschiedene Farben (gelb und blau) sowie zweierlei Arten von Linien (rot und grün), die mit Pfeilen versehen sind. Diese Ursteine dürfen auch gedreht und gespiegelt verwendet werden. Die Anlegeregeln sind: An den Kanten dürfen nur Linien gleicher Art und gleicher Pfeilrichtung aneinander stoßen, und in jeder Ecke müssen genau drei gelbe Quadrate zusammentreffen (rechts).





Eine Parkettierung, die diese Vorschriften einhält, kann notwendigerweise nur aperiodisch sein. Das leuchtet ein, wenn man sich einen größeren Ausschnitt eines solchen Parketts anschaut (links). Die grünen Linien sind weggelassen; durch die Anlegeregeln erzwungen, bilden die roten Linien ein Muster sich durchdringender, immer größer werdender Quadrate. Sie sind zur Verdeutlichung entsprechend der Größe des Quadrats umgefärbt: Je größer, desto stärker ist der Blauanteil. Das farbig unterlegte Gebiet entspricht dem oben gezeigten Ausschnitt.

Es gibt also beliebig große Quadrate aus roten Linien. Insbesondere findet sich zu jedem Vektor, der ein Translationsvektor sein könnte, ein Quadrat, das noch größer ist als die Länge des Vektors. Also kann der Vektor dieses Quadrat nicht in ein gleichartiges überführen. Demnach gibt es keinen Translationsvektor, der das gesamte Muster auf sich selbst abbildet. Also kann es nicht periodisch sein, was zu beweisen war.

Literaturhinweise

Directions in Mathematical Quasicrystals. Von M. Baake und R. V. Moody (Hg.). AMS, Providence (Rhode Island) 2000.

Tilings and Patterns. Von B. Grünbaum und G. C. Shephard. W. H. Freeman, New York 1987.

Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. Von D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias und J. W. Cahn in: Physical Review Letters, Bd. 53, S. 1951, 1984.

geben kann, hatte Robinson damit die Unentscheidbarkeit des Parkettierungsproblems bewiesen.

In diesem Zusammenhang dachte er sich eine einfache Kollektion aus 6 quadratischen Ursteinen aus, die eine aperiodische Parkettierung erzwingen (Kasten Seite 73). Eigentlich sind es 28 Ursteine, wenn man alle gedrehten und gespiegelten Versionen mitzählt.

Versehen wir nun die Mitte jedes Steins mit einem farbigen Punkt entsprechend der Steinsorte, so erhalten wir 6 (oder 28) Familien von Punkten, die Untermengen des Quadratgitters sind. Diese Punktmengen sind sogar Streifenprojektionsmengen, aber nun ist der „höherdimensionale" Raum viel exotischer: Er besteht aus dem Produkt einer euklidischen Ebene und eines arithmetisch-topologischen Raums, der auf den so genannten 2-adischen Zahlen basiert. Dennoch lässt sich beweisen, dass jede dieser Punktmengen rein punktstreuend ist! Die Methoden sind im Prinzip dieselben wie im eindimensionalen Beispiel.

Weiterhin offen bleibt jedoch die schwierige Frage, wie man Streifenprojektionsmengen allgemein charakterisieren kann, ob man also erkennen kann, ob es eine solche Projektion gibt, ohne dass sie explizit vorliegt.

Quasikristalle mit Baufehlern

Die bisher vorgestellten Konstruktionen für Quasikristalle sind alle sehr deterministisch: Ein übergeordnetes Prinzip, sei es Inflation oder die Projektion aus dem Streifen, weist jedem Stein oder eben jedem Atom seinen eindeutigen Platz zu.

Offensichtlich kann ein echter Quasikristall auf diese Weise nicht entstehen. Ein Atom, das sich an einen wachsenden Quasikristall anlagert, findet sicher keinen Platzanweiser vor, sondern allenfalls lokale Kräfte, die wie Anlegeregeln (oder auch weniger einschränkend) wirken. Die allein aber können, wie wir oben gesehen haben, nicht verhindern, dass der Aufbau der Struktur in eine Sackgasse gerät. Ein realer Quasikristall muss solche Baufehler entweder ausbessern können oder sie tolerieren, was seine Eigenschaft, rein punktstreuend zu sein, nur mäßig beeinträchtigen darf.

Zusätzlich zu den strengen Konstruktionsprinzipien muss es also Möglichkeiten geben, dass ein realer Quasikristall seine Struktur an einzelnen Stellen verändert. Für die Ammann-Beenker-Parkettierung gibt es eine solche Möglichkeit: den „Flip". In einem Sechseck aus einem Quadrat und zwei Rauten kann das mittlere Atom seine Position verändern, ohne dass der Rest des Parketts gestört wird: . Viele Flips können aufeinander folgen.

Damit betrachten wir anstelle eines einzigen Quasikristalls ein ganzes Ensemble von Strukturen, die von dem nach strengen Prinzipien erzeugten Quasikristall mehr oder weniger stark abweichen. Da die Anzahl der möglichen Abweichungen mit der Größe der Struktur exponentiell anwächst, ist eine Betrachtungsweise aus der statistischen Mechanik angebracht.

Für die Ammann-Beenker-Parkettierung ergibt sich dabei Erstaunliches. Man betrachte die große Klasse aller Parkettierungen der Ebene mit Quadraten und 45-Grad-Rauten, bei denen immer genau eine Kante an genau einer Kante liegt, das so genannte uneingeschränkte Quadrat-Raute-Zufallsparkettierungs-Ensemble. Indem man den Entropiebegriff aus der statistischen Mechanik auf dieses rein kombinatorisch definierte Ensemble überträgt, kann man zeigen: Die Parkettierungen mit der höchsten Entropie, und das heißt die erdrückende Mehrheit der Parkettierungen des Ensembles, haben genau dasselbe Verhältnis von Quadraten zu Rauten wie das perfekte Ammann-Beenker-Parkett und zeigen achtzählige, also maximale, Symmetrie.

Letzteres ist allerdings im statistischen Sinne zu interpretieren: Jeder überhaupt vorkommende Ausschnitt tritt mit derselben Häufigkeit in allen acht Orientierungen auf. Diese statistische Symmetrie ist weit weniger als die klassisch-strenge Symmetrie. Aber sie reicht aus, um im Beugungsbild eine exakte achtzählige Symmetrie zu erzeugen.

Für die realen Quasikristalle bedeutet das: Möglicherweise entstehen sie nicht dadurch, dass geheimnisvolle Kräfte alle Atome an den richtigen Platz setzen, sondern weil unter den astronomisch vielen Anordnungen, die den Atomen zur Auswahl stehen, die quasikristallin-symmetrische die wahrscheinlichste ist – statistisch gesehen. Indizien aus jüngster Zeit sprechen vielfach für diese Interpretation, die Veit Elser von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) 1985 erstmals vorgeschlagen hat.

Was ist aperiodische Ordnung?

Das Faszinierende an der hier betrachteten Ordnung ist ihre enge Verwandtschaft zur periodischen Ordnung, ohne dass sie selbst periodisch wäre.

Zur Zeit haben wir ein einigermaßen gutes qualitatives und zum Teil quantitatives Verständnis von aperiodischer Ordnung; einiges davon haben wir in diesem Artikel vorgestellt. Von einer vollständigen und abschließenden Theorie sind wir jedoch noch weit entfernt.

Es gibt ein ganzes Universum an interessanten Fragestellungen. Viele überraschende Ergebnisse werden zu Tage kommen und Querverbindungen zwischen scheinbar völlig verschiedenen Disziplinen herstellen. ■





Michael Baake *(links) hat in Bonn Physik, Mathematik und Philosophie studiert und 1987 über Anwendungen des Supersymmetrie-Konzepts promoviert. An der Theorie der Quasikristalle arbeitet er seit 1988, hauptsächlich in Tübingen, mit vielen auswärtigen Aufenthalten. Seit März 2001 ist er Professor für Mathematik an der Universität Greifswald.*

Uwe Grimm *(Mitte) hat in Bonn Physik studiert und ist nach Zwischenstationen in Melbourne (Australien), Amsterdam und Chemnitz seit Dezember 2000 Dozent (Lecturer) für Angewandte Mathematik an der Open University in Milton Keynes (England).*

Robert V. Moody *ist seit 1989 Professor für Mathematik an der Universität von Alberta in Edmonton (Kanada). Gemeinsam mit Victor G. Kac erweiterte er ein zentrales mathematisches Konzept für Symmetrie, die Lie-Gruppen und Lie-Algebren, auf unendlich viele Dimensionen; die entsprechenden Strukturen heißen heute Kac-Moody-Algebren. Seit zehn Jahren erforscht er die aperiodische Ordnung mit einer Vielzahl mathematischer Methoden.*



Eine spätassyrische Bibliothek entdeckt

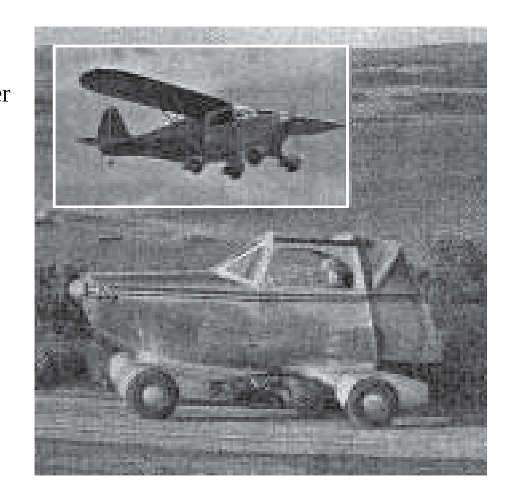
Eine türkisch-englische Expedition fand dieses Jahr im Gebiet des antiken Harran eine spätassyrische Bibliothek, von der bis jetzt 150 Urkunden – ungebrannte Tontafeln mit assyrischen Texten in assyrischer Keilschrift – geborgen und etwa 60 gelesen sind. Die Funde befinden sich in Ankara. … Die Urkunden wurden in einem Raum außerhalb der Bauanlage auf dem Sultan-Tepe gefunden. Ihr Aufschluß … ergab, daß es sich außer um Privaturkunden vorwiegend um religiöse Texte ähnlich denen handelt, die Assurbanipal in seiner Staatsbibliothek in Ninive gesammelt hatte: Hymnen, Gebete, Beschwörungsformeln, Orakeltexte u. a. m. Als wichtigstes Dokument wird ein Auszug aus dem Gilgamesch-Epos gewertet, das die Totenklage Gilgameschs um Endiku enthält. Man hofft, damit die entsprechenden unvollständigen Teile der Gilgamesch-Tafeln aus Ninive ergänzen zu können. *(Die Umschau, Heft 3, 1952, S. 87)*

Auf dem Weg zum Cern

Eine Konferenz europäischer Atomphysiker wurde im Haus der UNESCO in Paris abgehalten. Die Bundesrepublik war durch Prof. Dr. Werner Heisenberg und Dr. Alexander Hocker vertreten. 160 000 Dollar sollen bereits zur Finanzierung einer europäischen Atomforschungszentrale bereitgestellt sein. Als Ort einer solchen Zentrale, die die in den englischen, schwedischen und dänischen Laboratorien geleistete Arbeit überwachen soll, wurde Genf vorgeschlagen. *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, Nr. 5, 77. Jg., 1952, S. 159)*

Ein fliegendes Auto

Nunmehr hat die amerikanische Firma Continental ein „fliegendes Auto“ entwickelt, „Airphibian“ genannt, das eine der interessantesten und fortschrittlichsten Lösungen darstellt. Es ist ein Sport- und Reiseflugzeug für zwei Erwachsene und ein Kind. Von den üblichen Flugzeugen dieser Gattung unterscheidet es sich äußerlich zunächst nur dadurch, daß sein Fahrwerk vier Räder besitzt. Aber der gesamte Rumpf-Vorderteil mit Motor ist innerhalb von drei Minuten ohne jedes Werkzeug vom übrigen Flugzeug zu lösen. Übrig bleibt ein für alle Straßen geeignetes Auto. … Als Flugzeug erreicht das „Airphibian“ eine Reisegeschwindigkeit von rund 180 Kilometer in der Stunde, während es als Auto bis zu 75 Kilometer in der Stunde fährt. *(Das Neue Universum, 69. Band, 1952, S. 174)*



Das „Airphibian“: Automobil und Flugzeug in einem

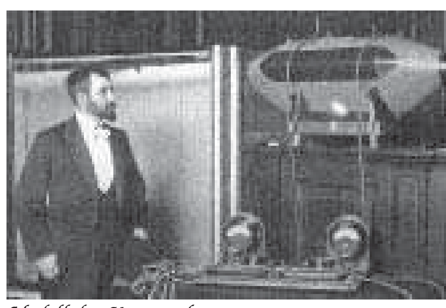
1902

Lichtgeschwindigkeit gemessen

Die Geschwindigkeit des Lichtes, diese so überaus wichtige physikalische Constante, ist von Perrotin auf dem Observatorium in Nizza nach der Fizeau-Cornu’schen Methode abermals bestimmt worden. Aus 1500 Messungen, die die Arbeit eines Jahres erforderten, da nur bei ganz ruhiger Luft beobachtet werden konnte, ergab sich als Geschwindigkeit der Werth von 299.900 Kilometer in der Secunde, mit einem Fehler, der nicht mehr als 80 Kilometer im positiven oder negativen Sinne betragen kann. *(Der Stein der Weisen, Rubrik Naturwiss. Rundschau, 27. Bd., 1902, S. 69)*

Im Unterseeboot zum Nordpol

Kürzlich hielt nun der Urheber des Projects, Dr. Anschütz-Kämpfe, in der k. k. Geographischen Gesellschaft zu Wien einen Vortrag, in dem er auch das Modell des zu construirenden Unterseebootes, soweit dies in einem Bassin möglich war, … in der Function vorführte. Er zeigte, daß das Modell sowol als Ueberflutungs- als auch Taucherboot zu verwenden sei. Die Function als Ueberflutungsboot kommt dann in Betracht, wenn größere Strecken in eisfreiem Wasser zurückgelegt werden sollen; die Eigenschaft als Taucherboot dann, wenn es gilt, Eisbarriren oder größere Eisfelder durch Unterfahrt zu überwinden. Die Mitnahme des nötigen Petroleums, der für einen Aufenthalt von zwei Jahren im Eismeer ausreichen soll, sowie des Proviants für fünf Mann für die gleiche Zeit, ferner der Wasserballast und der Wohnraum bedingen die Größe des Bootes, das 850 bis 900 Tonnen enthalten soll. *(Illustrirte Zeitung, Bd. 118, Nr. 3059, 13. Februar 1902, S. 244)*



Modell des Unterseeboots

Das kleinste Wirbeltier

Der Kleinheitsrekord dürfte von einem Fischchen geschlagen sein, das Amerikaner jetzt auf den Philippinen gefunden haben. Wie die U. St. Fishery Commission der „Science“ mitteilt, lebt dieses mit wissenschaftlichen Namen Mistichthys bezeichnete Fischchen im Buhi-See im südlichen Teil der Insel Manila. Es ist lebend fast ganz durchsichtig und trägt nur wenige schwarze Zeichnungen auf dem Körper. Wahrscheinlich bringt es seine Jungen lebend zur Welt … Die Weibchen sind etwas größer als die Männchen und messen 12–15 Millimeter, die Männchen sind nur 10–13 mm gross. … Gekocht werden die Fischchen mit Pfeffer und anderen Gewürzen und sollen nicht schlecht schmecken. *(Die Umschau, Nr. 6, VI. Jg., 1902, S. 117)*

ARCHÄOMEDIZIN

Chirurgie im alten Ägypten

Ärzte trauten sich im Reich der Pharaonen wohl mehr zu als bislang angenommen. Jüngste Untersuchungen an Mumien belegen größere Operationen, die auch gut verliefen.

Von Andreas Nerlich

Unter den Wissensgebieten der frühen Hochkultur Ägyptens erfreute sich die Heilkunde vermutlich besonderer Hochachtung. So jedenfalls berichten es griechische Schriftsteller und Gelehrte seit Homer, also seit dem 8. Jahrhundert vor Christus. Im vierten Gesang der „Odyssee“ heißt es (in der Übersetzung von Johann Heinrich Voß): „Dort ist jeder ein Arzt und übertrifft an Erfahrung alle Menschen.“ Mit ihrem eigenen Gott der Medizin, Asklepios beziehungsweise Äskulap, verglichen die Griechen sogar einen ägyptischen Sterblichen – Imhotep, um 2600 vor Christus Wesir, Architekt und Astrologe des Pharaos Djoser, des Bauherrn der Stufenpyramide von Sakkara. Ihm wurde zwei Jahrtausende nach seinem Ableben im eigenen Lande ebenfalls göttliche Verehrung zuteil, und Kranke pilgerten zu den Imhotep-Tempeln in Memphis und auf der Insel Philae. So nimmt es nicht wunder, dass im Altertum Adlige aus Vorderasien und dem Mittelmeerraum zu Konsultationen an den Nil reisten und ägyptische Ärzte vielfach an fremden Fürstenhöfen tätig waren.

Ihr Wirken lässt sich aus schriftlichen Belegen ableiten. Mehrere Papyri geben detaillierte Anweisungen zur Behandlung verschiedenster Krankheiten (Kasten Seite 78). Überraschenderweise werden darin aber kaum chirurgische Techniken beschrieben. Auch zeitgenössische Hinweise von anderer Seite fehlen. So schrieb der griechische Chronist Herodot (nach 490 – 425 v. Chr.): „Jeder Arzt behandelt nur eine Krankheit ... es gibt Augenärzte, Ohrenärzte, Zahnärzte, Magenärzte und Ärzte für bestimmte innere Krankheiten.“ Doch bei dieser Liste von Fachärzten führte er keine Chirurgen auf! So ist es nicht verwunderlich, dass Archäologen bis vor kurzem daran zweifelten, dass es überhaupt größere und geplante Operationen gegeben hat. Wir haben aber an Mumien eindeutige Hinweise gefunden, die auf ein wohl überlegtes und durch Erfahrung gestütztes Vorgehen hindeuten.

Honig auf die Wunde

Doch betrachten wir zunächst die Hinweise in den medizinischen Schriften der Zeit. Der Papyrus Smith beschreibt Verletzungen vom Kopf bis etwa zur Körpermitte und deren Folgen sowie entsprechende Gegenmaßnahmen. Da der Text abrupt abbricht, gilt es als wahrscheinlich, dass er Teil einer Lehrschrift war, die Verletzungen des menschlichen Organismus systematisch von oben nach unten abgehandelt hat. Die oft sehr klaren, gut nachvollziehbaren Empfehlungen beeindrucken auch heute noch, zumal manche sogar modernen Behandlungsrichtlinien entsprechen.

So lautet die Anweisung bei einem Schädelbruch, der das Gehirn nicht freilegte, er könne mit einem Verband zur Ruhigstellung und Blutstillung durchaus behandelt werden. Als medizinisch wirksame Substanz wird häufig Honig genannt, dessen bakterizide Wirkung gute Dienste geleistet haben dürfte. Hingegen galt ein Schädeltrauma mit freiliegendem Gehirn („wenn du das Gehirn pulsieren siehst“) als nicht mehr therapierbar.

Der Fall 36 des Werkes beschreibt einen geschlossenen Bruch des Oberarmknochens, also ohne Durchspießung der Weichteile. Er sei mit hölzernen Splinten zu schienen. Solche Hilfsmittel hat der in Kairo lebende Anatom Elliot Smith 1908 tatsächlich an zwei Mumien gefunden (siehe Bild Seite 78). Die Patienten hatten ihre Verletzungen – eine Oberarmbeziehungsweise eine Oberschenkelfraktur – allerdings vermutlich nicht lange überlebt, denn an den Bruchkanten war kein neuerliches Knochenwachstum festzustellen. Eine Verfärbung der umliegenden Weichteile deutete Smith als Blu- ▶

Als früheste Darstellung chirurgischer Geräte Ägyptens gilt dieses Relief am äußeren Umgang des Tempels von Kom Ombo, etwa 45 Kilometer nördlich von Assuan (die Anlage ist dem Krokodilgott Sobek und Haroeris, dem falkenköpfigen „ehrwürdigen Horus“, gewidmet; sie wurde in den letzten beiden vor- und ersten beiden nachchristlichen Jahrhunderten erbaut). Das Relief zeigt in der oberen Reihe Messer, Sonden, Bohrer, eine Säge und Pinzetten, in der zweiten Haken, Zangen und Gefäße. In der dritten sind Zangen, zugebundene Beutel und eine Waage zu sehen.

LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT, MÜNCHEN (LMU)



ENTNOMMEN AUS: SMITH E. DAWSON W. EGYPTIAN MUMMIES. UNWIN LTD. LONDON, 1924

Diese an einer Mumie entdeckte Schienung einer frischen, nicht verheilten Fraktur des Oberarms wurde bereits 1908 von dem Anatomen Elliot Smith dokumentiert. Die Bandage mit zwei hölzernen Stäben dürfte die Bruchzone gut stabilisiert haben.

tungsreste – ein Hinweis darauf, dass der Bruch tatsächlich zu Lebzeiten auftrat und nicht etwa der Leiche zugefügt worden ist. Bemerkenswert ist, dass mit Fall 37 eine ähnliche, jedoch offene Fraktur folgt und als „Verletzung, die du nicht behandeln sollst" klassifiziert ist: Bis weit in die Neuzeit hinein endete eine solche Fraktur mit tödlichem Wundfieber. Die dafür verantwortliche bakterielle Infektion der Bruchstelle kannten die ägyptischen Ärzte freilich nicht.

Vereinzelt liefern medizinische Dokumente zu anderen Themen durchaus indirekte Hinweise auf chirurgische Maßnahmen. Insbesondere gibt es im Papyrus Ebers einige Beispiele für Eingriffe bei anderen Erkrankungen. So seien „Schwellungen", mit denen vermutlich Abszesse oder Wasserblasen gemeint sind, durch Einschneiden mit dem *hemem* genannten Messer zu öffnen. Unklar bleibt freilich, inwieweit diese Anweisung sich auch auf Schwellungen bezieht, die als umschriebene Auftreibungen – beispielsweise Tumoren – in verschiedenen bildlichen Darstellungen zu erkennen sind. Ebenso wenig gibt es einen Anhalt zur Erfolgsrate.

In der Liste der Hinweise auf chirurgische Maßnahmen darf die Beschneidung nicht fehlen. Sie wurde erst im Pubertätsalter vorgenommen, also vermutlich im Zusammenhang mit der Initiation (obschon der griechische Chronist Herodot berichtete, sie sei „der Reinlichkeit wegen" üblich). In Texten wird sie mehrfach erwähnt, und ein Relief im Grab des Arztes Anchmahor in der Nekropole von Sakkara aus der Zeit der 6. Dynastie (2290–2157 vor Christus) zeigt das Vorgehen sehr detailliert: In der ersten Szene steht ein Junge, dessen erhobene Hände ein hinter ihm postierter Helfer festhält, vor einem hockenden Priester oder Arzt, der mit einem Gegenstand – vielleicht einem Schwamm – das Glied behandelt. Der begleitenden Inschrift „Reibe kräftig,

Medizinische Papyri

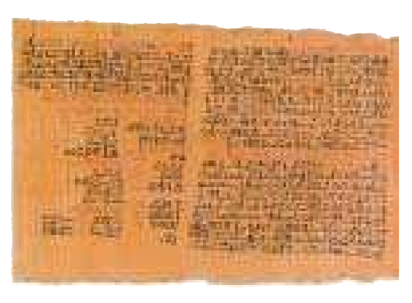
Aus den rund drei Jahrtausenden vor Christus von der Reichseinigung Ägyptens und der Entwicklung der Hieroglyphen bis zur Herrschaft Octavians, des späteren römischen Kaisers Augustus, sind nur etwa ein Dutzend Dokumente medizinischen Inhalts bekannt. Zusätzlich nehmen zahlreiche kleinere Zaubertexte mehr oder weniger deutlich Bezug auf Krankheiten. Die ärztlichen Werke wurden in Alltagssprache verfasst und in der Hieratisch genannten kursiven Gebrauchsschrift geschrieben. Wichtige Stellen wie Überschriften, Drogenquanten und die Gliederung der Diagnosen hat man mit roter Tinte hervorgehoben.

Das bedeutendste Fachbuch, hauptsächlich der Wundbehandlung gewidmet, ist der Papyrus Smith. Benannt ist es nach dem amerikanischen Abenteurer und Antiquitätenhändler Edwin Smith, der es 1862 von Mustafa Agha, dem britischen Konsul in Luxor, erwarb. Es umfasst 377 Zeilen auf der Vorder- und 92 Zeilen auf der Rückseite; entstanden ist es um 1700 vor Christus, basiert aber großenteils auf rund 900 Jahre älteren Texten. James Henry Breasted, Direktor des Orientalischen Instituts der Universität Chicago, publizierte 1930 ein Faksimile mit Umschrift, Einleitung, englischer Übersetzung und Kommentar sowie medizinischen Anmerkungen von Arno B. Luckhardt. Der Papyrus wird von der New Yorker Akademie der Wissenschaften aufbewahrt.

Die mit mehr als 20 Metern Länge umfangreichste medizinische Sammelhandschrift ist der Papyrus Ebers (unten), der ebenfalls 1862 in den Besitz von Smith kam. Der Ägyptologe Georg Ebers erwarb das Dokument 1872 für die Leipziger Universitätsbibliothek und publizierte drei Jahre später ein Faksimile mit einer Einleitung sowie einem englischen und einem lateinischen Vokabular. Darin sind in ziemlich willkürlich anmutender Anordnung Krankheiten und Verletzungen verschiedener Körperregionen, Diagnosen, Prognosen und Heilmittel – auch von Göttern verwandte – aufgeführt. Einer Notiz auf der Rückseite zufolge wurde der Papyrus in der Regierungszeit des Pharaos Amenophis I. geschrieben, mithin im späten 16. Jahrhundert vor Christus; auch in diesem Falle scheinen aber zumindest Teile des Inhalts sehr viel früher entstanden zu sein.

Der Papyrus Kahun enthält 34 Paragrafen über Empfängnis, Kontrazeption, Schwangerschaft, Geburt und gynäkologische Probleme. Das Werk aus der Zeit um 1810 vor Christus wurde 1889 von dem englischen Archäologen Flinders Petrie im Oasengebiet Fayum gefunden; es liegt nun im Londoner University College.

Weitere medizinische Fachbücher sind der Papyrus Ramesseum V mit Rezepten gegen Versteifungen und Verkrümmungen und der Papyrus Beatty VI, der Einläufe gegen Erkrankungen des Leibes beschreibt. Andere Dokumente behandeln etwa die Bisse von Schlangen, Schwangerschaftstests und Geburtsprognosen, enthalten aber auch viele kosmetische Rezepte, etwa für Mittel gegen Ergrauen, Falten und Mundgeruch oder für die Haarentfernung. Sogar ein veterinärmedizinischer Text ist erhalten.



Der Papyrus Ebers – ein 20 Meter langes Medizinbuch der Pharaonen

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK LEIPZIG

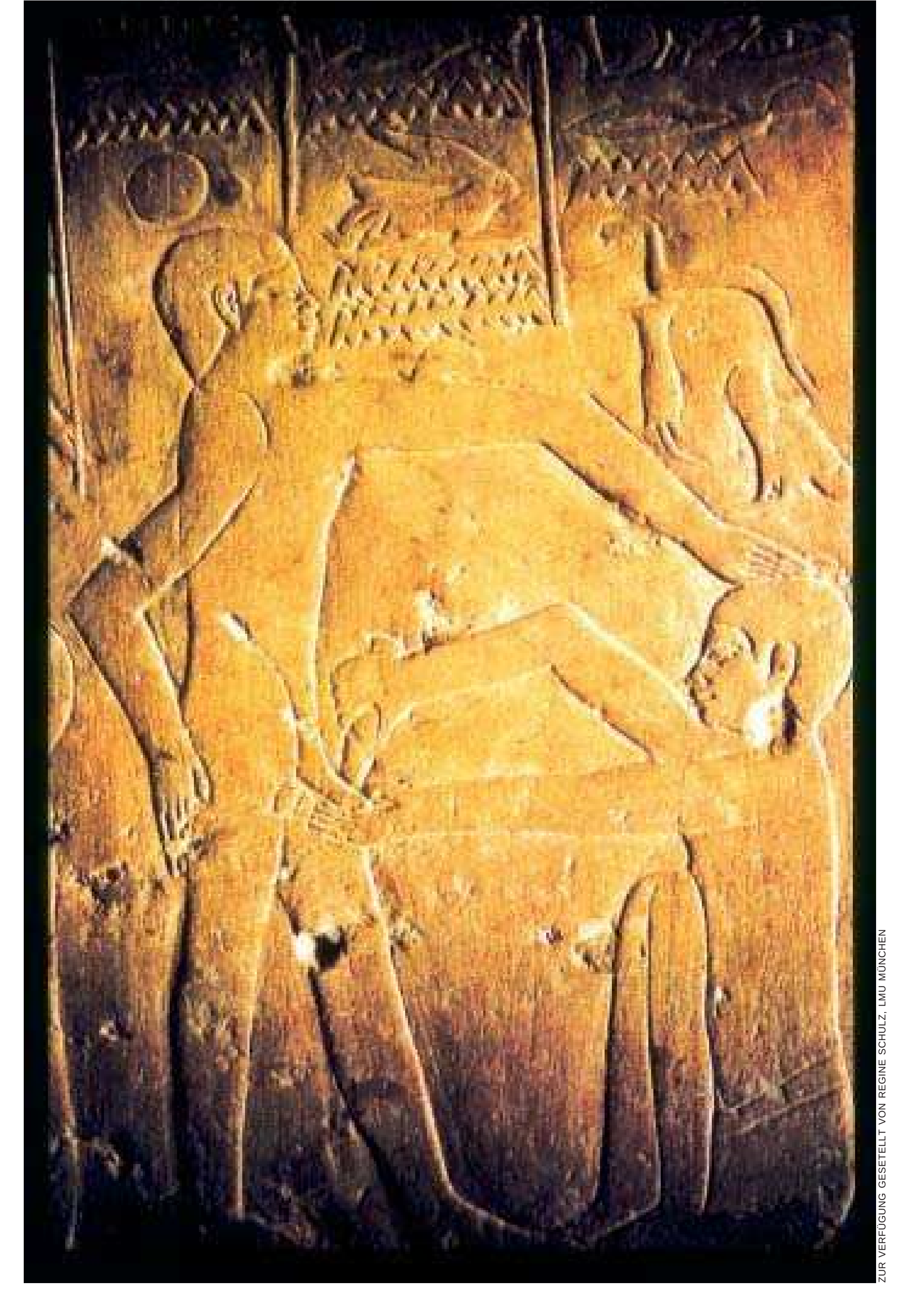
damit es wirksam ist“ ist allerdings nicht zu entnehmen, ob es sich nur um eine Reinigung oder eine lokale Anästhesie handelte. In der zweiten Szene setzt der Operateur ein Messer an der Vorhaut des Jungen an (siehe Bild rechts). Das Bild verrät auch nicht, ob dort ein Arzt oder Priester zu Werke ging. Nach den bisherigen Befunden an Mumien waren in der Antike so gut wie alle erwachsenen Ägypter beschnitten; der Eingriff, wiewohl ursprünglich vielleicht durch hygienische Vorsorge motiviert, diente also wohl nicht primär medizinischen Zwecken wie dem Beheben einer Phimose, sondern war ein religiöser Brauch wie noch heute bei Juden und Muslimen.

Es war nahe liegend, die Auswertung der wenigen schriftlichen und bildlichen Quellen durch paläopathologische Untersuchungen an Mumien zu ergänzen. Archäologen und Pathologen begannen damit gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Schätzungsweise 30000 Mumien und Mumienreste hatten sie bis zum Ende der 1920er Jahre untersucht, ohne auch nur eine chirurgische Narbe zu finden. Daran änderte sich auch bei einigen späteren Unternehmungen dieser Art nichts, wie James T. Rowling in London 1989 konstatierte. Ergo schlossen die Archäologen: Im Wesentlichen seien nur sehr oberflächliche Eingriffe im antiken Ägypten üblich gewesen.

Neue Techniken, kleine Sensationen

Auf der Suche nach pathologischen Veränderungen an Mumien- und Skelettresten aus Theben-West haben meine Kollegen und ich in den vergangenen sieben Jahren aber doch noch Spuren chirurgischer Kunst entdeckt; dabei kooperierten wir sehr eng mit dem Pathologischen Institut der Universität München, dem Ägyptologischen Institut der Universität Heidelberg, dem Deutschen Archäologischen Institut Kairo und dem Egyptian Supreme Council of Antiquities.

Den ersten Beleg lieferte der Schädel eines erwachsenen Mannes, der vor rund fünfzig Jahren nach Deutschland gebracht wurde (mehr wissen wir leider nicht über den Fund). Die Art der Mumifikation lässt darauf schließen, dass er in der ersten Hälfte der Dritten Zwischenzeit (1080–714 vor Christus) gestorben war. Unter den Leinenbinden kam eine intakte Schicht von Haut und Weichteilen samt dichtem Haar zu Tage (siehe Bild auf der nächsten Seite). Nach der äußeren Inspektion und der Entnahme kleiner Harzplomben, die Nase und Ohren verschlossen, führten wir ein Endoskop in den Schädel ein: zunächst durch die beiden Mittelohren, dann über die Nasenhöhle und schließlich durch eine Öffnung im Nasenhöhlendach, durch die die Einbalsamierer das Gehirn entfernt hatten (Spektrum der Wissenschaft 8/2001, S. 34).



ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON REGINE SCHULZ, LMU MÜNCHEN

Das Relief aus dem Grab des Arztes Anchmahor in Sakkara veranschaulicht das Beschneidungsritual in der Zeit der 6. Dynastie (2290 – 2157 vor Christus).

Uns fiel sofort auf, dass die rechte Kette der Gehörknöchelchen vollständig und gut erhalten war, die linke hingegen fehlte. War sie noch zu Lebzeiten entnommen worden oder kurz nach dem Tode bei der Mumifizierung herausgefallen? In der Schädelhöhle erkannten wir eine flache, bräunliche Schicht über dem Hinterhauptsbein. Solches Material wurde häufig eingegossen, um die Körperhöhlen zu konservieren; es erstarrte, während der Leichnam flach auf dem Rücken lag. Zudem bedeckte eine eigenartige flache, dunkelbraune Schicht tapetenartig einen Bereich der linken Seite der mittleren Schädelgrube.

Die Computertomographie (CT) brachte die Überraschung: Wir entdeckten unter völlig intakten Haut- und Weichteilen über dem linken Scheitelbein knapp oberhalb des linken Ohres einen großen, ovalen Defekt im Knochen, vermutlich infolge eines schweren Schlages. Von der Oberkante des Bruchs verlief ein Riss in die Schädelkalotte. An seinem Rand war

Literaturhinweise

Ägypten zur Pharaonenzeit. Alltag und gesellschaftliches Leben. Von Eugen Strouhal. Wasmuth Verlag, Tübingen, Berlin, 1994.

Erwachen der Heilkunst. Die Medizin im Alten Ägypten. Von W. Westendorf. Artemis und Winkler, Zürich 1992.

Ancient Egyptian prosthesis of the big toe. Von A. G. Nerlich et al. In: Lancet, Band 356, S. 2176, 2000.

Ancient Egyptian medicine. Von J. F. Nunn. In: British Museum Press, S. 163, London 1996.

vereinzelt eine leichte Knochenneubildung auszumachen. Die histologische Analyse einer kleinen Probe unterstrich, dass die Verletzung nicht sofort tödlich verlaufen war – es gab stellenweise Pigment, wie es beim Blutabbau entsteht.

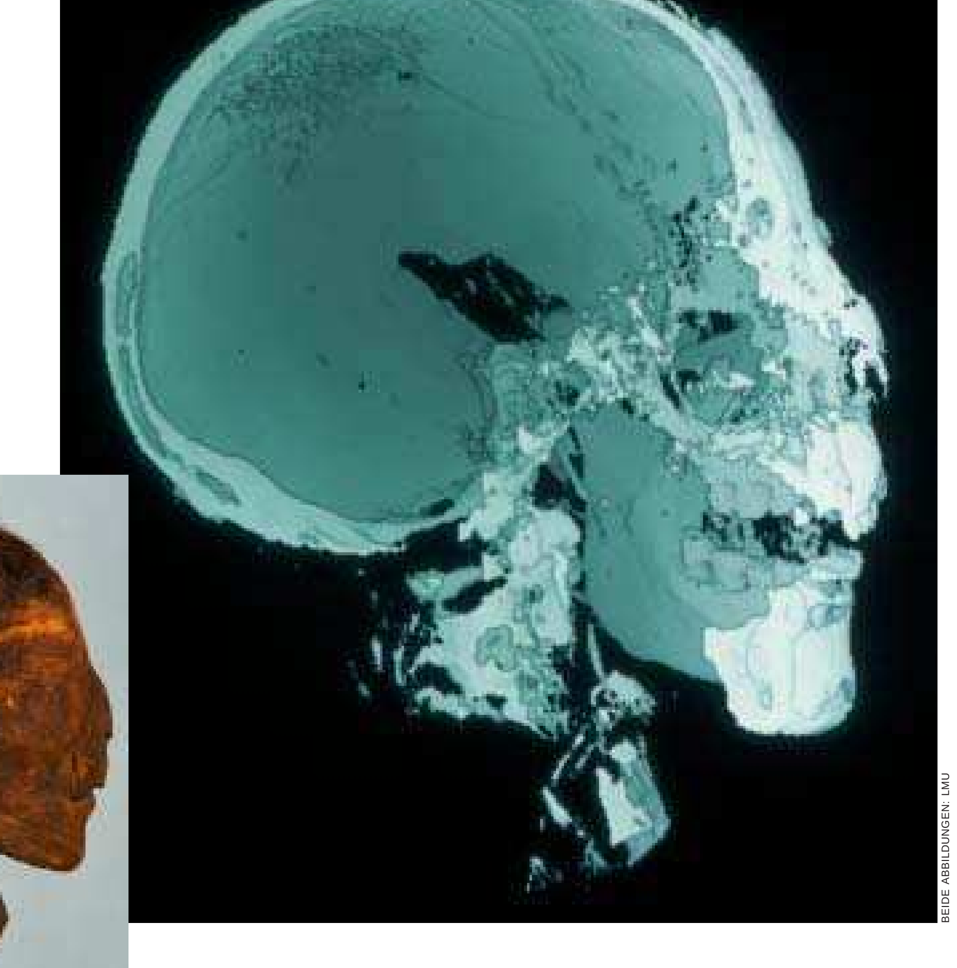
Weit interessanter scheint jedoch, dass in der Defektzone Knochenfragmente fehlten. Die Auflagerung darunter im Inneren – vermutlich Reste der intakten, wenngleich verklebten harten Hirnhaut – und die ebenfalls intakte, also verheilte äußere Haut belegen: Ein Arzt hatte die Wunde versorgt, das Gewebe vermutlich aufgeschnitten und weggeklappt, danach die sicher vorhandenen Knochensplitter entfernt. Die Gehörknöchelchen der linken Seite waren bei dem Schlag aus ihrer normalen Position geraten und dann nach dem Tode, aber vor der Mumifikation herausgefallen.

Unser zweiter Fall war ein mumifizierter Fuß aus einem Grabkomplex in Theben-West; er stammte aus der so genannten Ramessiden-Zeit (1305–1080 vor Christus), in der elf Pharaonen der 19. und 20. Dynastie Ramses hießen. Merkmale der betreffenden Person wie Alter oder Geschlecht lassen sich an diesem Körperteil nicht mehr bestimmen. Besonders bemerkenswert ist es insofern, als nahezu der gesamte Vorfuß amputiert worden war. Die Operation gelang, denn die Wunde verheilte: Eine völlig intakte Schicht von Haut und Weichteilgewebe bedeckte die Schnittstelle, und selbst eine Narbe oder ein sonstiger Defekt ist heute nicht mehr zu erkennen (siehe Bild Seite 82). Unsere Röntgen- und CT-Untersuchung ergab, dass lediglich der fünfte Zehenstrahl teilweise erhalten blieb, dann aber verkümmerte. Auch diese Aufnahmen zeigen weder Fehlbildungen noch Verletzungsfolgen.

Vermutlich hatte dieser Patient mehrere Monate, möglicherweise sogar etliche Jahre überlebt, obwohl an den erhaltenen Knochen keine wesentlichen Umbaureaktionen stattfanden, wie sie eigentlich zu erwarten gewesen wären. Komplikationen gab es keine, beispielsweise hätte eine Wundinfektion narbige Wulstbildungen oder knöcherne Wucherungen hinterlassen können. Über den Anlass der Amputation kann man nur spekulieren. Eine Verletzung scheint uns am wahrscheinlichsten. Zwar gibt es keinen Hinweis hierfür am restlichen Fußskelett, aber es fanden sich auch keine Anhaltspunkte für sonstige Anlässe eines solch drastischen Eingriffs wie Durchblutungsstörungen oder eine nicht verheilende Entzündung.

Eine vergleichbare, obwohl nicht ganz so ausgedehnte Operation überstand eine Frau, die im Alter von etwa fünfzig Jahren verstarb. Ihre Mumie ist zwar stark zerstört, wohl das Werk von Grabräubern, aber beide Füße, der rechte Unterschenkel und beide Oberschenkel waren noch mit harzigem Balsam überzogen und auch mit Leinenbinden umwickelt. Uns fiel der rechte Vorfuß auf, denn zwischen den Stoffstreifen stak ein Fremdkörper. Es handelte sich um einen sorgsam geschnitzten hölzernen Ersatz der offensichtlich schon vor längerer Zeit abgetrennten großen Zehe (siehe Bild Seite 83).

Den Stumpf des ehemaligen Zehengrundgelenks überzog unversehrte Haut und unauffälliges Weichteilgewebe, Hinweise auf Wundheilungsstörungen feh-



Das kleine Bild zeigt den mumifizierten Kopf eines Mannes aus der Nekropole Theben-West nach der Abnahme der Leinenbinden. Erst die computertomographische Aufnahme (großes Bild) lässt einen großen ovalen Knochendefekt unter intakten Weichteilen erkennen. Obwohl der Bruch nach innen leicht trichterförmig erweitert war, fanden die Pathologen keine Knochensplitter mehr – Hinweis auf eine saubere Operation.

BEIDE ABBILDUNGEN: LMU

Die Heilkunde in der Pharaonenzeit

Die Medizin war ein weit entwickelter Zweig der ägyptischen Hochkultur. Viele Facetten der Behandlung von Kranken und Verletzten blieben jedoch bislang trotz intensiver Forschung im Dunkeln. Erschwert wird unser Verständnis vor allem durch eine uns fremde Denkweise der altägyptischen Ärzte. Einerseits verwandten sie eine Fülle von Heilpflanzen; in schriftlichen Quellen sind mehr als 700 Arzneien verzeichnet, deren Wirkstoffe erst zu einem geringen Teil identifiziert wurden. Andererseits hatten sie kaum Kenntnisse von der Anatomie und den Funktionen des menschlichen Körpers, obgleich Leichen zu Tausenden systematisch für die Mumifizierung geöffnet und die inneren Organe entnommen wurden. So galt das Herz als Sitz des Denkens und Fühlens und als Zentrum eines Gefäßsystems, das alle Körperteile mit Blut, Wasser und Luft versorgt sowie auch Tränen, Urin und Sperma transportiert; es wurde beim Mumifizieren selten entnommen. Charakteristisch war eine Verquickung von empirisch bewährten, teils geradezu naturwissenschaftlich sachgerechten mit mythisch-religiösen Handlungsweisen wie Traumdeutungen sowie der Anwendung von Zaubersprüchen, Amuletten und vielen Substanzen wie Kontrazeptionspillen aus Krokodilkot. Als Ursachen von Leiden, die wir als Infektion mit pathogenen Keimen kennen, wurden damals „übel gesinnte Männer und Frauen“ angesehen, „lebende oder gar tote“, wie es im Papyrus Smith heißt. „Fließ aus, du Schnupfen …, der du die Knochen zerbrichst, den Schädel einreißt und im Gehirn herumhackst und die sieben Öffnungen des Kopfes krank machst“, lautet eine Beschwörungsformel im Papyrus Ebers. Indes scheinen die magischen Praktiken erst im Neuen Reich, also ab etwa 1550 vor Christus, überhand genommen zu haben.

Allerdings sind in etlichen Papyri auch viele Diagnose- und Therapieverfahren aufgeführt, die neuzeitlichem Wissensstand entsprechen, so Rizinusöl als Abführmittel, Räuchern mit Weihrauch zur Schmerzlinderung oder die Wurzel des Granatapfelbaumes gegen parasitäre Würmer. Solche pflanzlichen Wirkstoffe werden noch immer angewandt. Sinnvollerweise wurde bei Nachtblindheit, die auf Mangel an Vitamin A beruhen kann, tierische Leber verordnet, bei Kopfweh ein feuchter Umschlag, bei Husten Milch und Honig, bei Verstopfung ein Klistier, bei einer Verrenkung eine Bandage und tägliche Massage. Herodot war über das allgemeine Reinlichkeitsbedürfnis erstaunt; ihm zufolge haben zumindest die Priester zweimal tags und zweimal nachts gebadet und sich jeden dritten Tag nicht nur den Kopf, sondern auch den Körper rasiert, „damit sich weder eine Laus noch irgendein anderes Ungeziefer an ihnen festsetze“.



LMU

Die löwenköpfige Sachmet, Gattin von Ptah, dem Hauptgott der Residenzstadt Memphis, war die Schutzgöttin der Ärzteschaft. Ihre Attribute – einerseits Blut, Tod und Zerstörung, andererseits Heilkraft – wurden sicherlich häufig auch mit notwendigen chirurgischen Maßnahmen assoziiert.

len ganz. Auf Röntgenaufnahmen ist zudem ein wulstiger Umbau am verbliebenen Mittelfußknochen des ersten Zehenstrahls zu sehen. Dies und die Abnutzungsspuren an der Unterseite der Prothese belegen, dass die Operation Jahre vor dem Tode stattgefunden hatte. Mithin war den altägyptischen Chirurgen auch in diesem Falle eine Amputation gelungen, und sie hatten es ebenso geschafft, dass die Wunde komplikationslos abheilte.

Das war eigentlich gar nicht zu erwarten gewesen. Denn bei unserer weiteren Untersuchung erkannten wir auf Röntgen- und CT-Aufnahmen Verkalkungen nicht nur der Aorta, von der ein rund zwölf Zentimeter langes Segment über der Brustwirbelsäule erhalten ist, sondern auch der kleinen Arterien im behandelten Fuß. Vermutlich hatte Arteriosklerose die Durchblutung der großen Zehe dermaßen gestört, dass sie nekrotisch wurde und entfernt werden musste, um das Leben der Patientin zu retten. Ein hohes Risiko bestand insofern, als eine Arteriosklerose meistens die Wundheilung stört. Der erfolgreiche Eingriff und die geschickte Anpassung der Prothese zeigen, wie umsichtig der behandelnde Arzt die Operation geplant und ausgeführt hat.

Weihrauch gegen die Schmerzen

Nicht anders als heute dürften auch Kieferchirurgen in Altägypten Arbeit gefunden haben. Das Gebiss der Völker des Altertums litt durch mineralische Körnchen im Mehl – Abrieb der steinernen Getreidemühlen. Hinzu kamen in Ägypten Staub und feiner Sand, den der Westwind aus der Libyschen oder der Ostwind aus der Arabischen Wüste in den schmalen bewohnbaren Landstreifen am Nil wehte. Die harten Partikel schliffen Zahnschmelz und Zahnbein oft so stark ab, dass schließlich der Wurzelkanal offen lag, in den dann Bakterien eindringen konnten. Auch Pharaonen und hohe Würdenträger litten an schmerzhaften Wurzelabszessen und anderen Problemen mit dem Kauapparat, wie die erste dentalmedizinische Röntgenuntersuchung der Mumien im Ägyptischen Museum von Kairo Ende der 1960er Jahre ergab. Über die zahnärztliche Versorgung in der frühen Hochkultur ist denn auch ausgiebig diskutiert worden, ohne dass bislang eine klare Meinung obsiegte.

Wir selbst haben keinen Beleg für einen kieferchirurgischen Eingriff gefunden, doch sei nicht unerwähnt, dass an einem Unterkiefer aus Sakkara aus der Zeit des Neuen Reiches (1554 oder 1551 – 1080 vor Christus) zwei parallele, scharf begrenzte Löcher über einem

Wurzelabszess gefunden wurden, die aussehen, als seien sie absichtlich gebohrt worden. Skeptiker glauben indes, es handele sich um einen spontan gebildeten, lediglich ungewöhnlichen Defekt. Denn die ausführliche Analyse von mittlerweile Tausenden von Mumienschädeln mit zahllosen Wurzelabszessen ergab keinen weiteren derartigen Befund.

Die bis heute stärksten – allerdings auch umstrittenen – Indizien für zahnchirurgische Maßnahmen sind recht alt. Ebenfalls bei einer Mumie aus Sakkara entdeckte der österreichische Forscher Hermann Junker 1914 zwei mit Golddraht befestigte Backenzähne. Ein ganz ähnlicher Fund von Shafik Farid im Jahre 1952 erhärtete schließlich die Meinung, altägyptische Zahnärzte hätten auf diese Weise Lücken im Gebiss durch Prothesen überbrückt. Dagegen wurde eingewandt, dass die fremden Zähne keinerlei Abnutzungsspuren aufweisen, also möglicherweise erst nach dem Tode eingefügt wurden, um den Leichnam wieder zu vervollständigen.

Das Operieren selbst ist nur eine Seite chirurgischer Kunst. Hinzu kommen Verfahren, die Schmerzen des Eingriffs selbst lindern und die Heilung fördern. Bis vor rund 150 Jahren erfolgten schwere Operationen wie Amputationen oder das Entfernen von Blasensteinen ohne Betäubung und zumeist ohne wesentliche Schmerzbehandlung; den guten Chirurgen zeichneten dementsprechend vor allem Geschicklichkeit und Geschwindigkeit aus. Doch manches Opfer starb auf Grund der Kreislaufkomplikationen, die wiederum als Folge unerträglicher Pein auftraten.

Altägyptische Ärzte hatten schon sehr früh die schmerzmildernde Wirkung von bestimmten Pflanzen und pflanzlichen Inhaltsstoffe entdeckt. Besonders scheint sich Weihrauch bewährt zu haben, der – wie Haschisch – erhebliche Mengen von Tetrahydrocannabinol enthält; sein euphorisierender Effekt hilft auch bei der Verarbeitung von Schmerz. Bereits im dritten vorchristlichen Jahrtausend holten Handelsschiffe große Mengen des im Tempelkult gebrauchten Harzes aus dem Lande Punt, einer in vielen Inschriften erwähnten Region, wahrscheinlich am südlichen Roten Meer hinter der Küste des heutigen Eritrea gelegen. Die Königin Hatschepsut (Regierungszeit 1490–1468 vor Christus) und König Ramses III. (1193–1162 vor Christus) importierten sogar Weihrauchsträucher, aber der Anbau misslang.

Die Anwendung des Harzes ist zum einen aus der Beschreibung von Räucherszenen bei zahlreichen Krankheiten bekannt, zum anderen durch biochemische Untersuchungen von Mumien in jüngster Zeit belegt, wie auch wir sie angestellt haben. So fanden wir Tetrahydrocannabinol in der Lunge einer Mumie – es muss zu Lebzeiten eingeatmet worden sein. Unklar ist hingegen, ob weitere Schmerzmittel wie Morphin eingesetzt wurden, obgleich Mohnpflanzen und ihre Früchte als Grabbeigaben zu Tage kamen. Jedenfalls scheint es durchaus plausibel, dass die antiken Ärzte psychoaktive Substanzen kannten, die Schmerzen zu lindern vermögen und somit chirurgische Eingriffe erleichtert hätten.



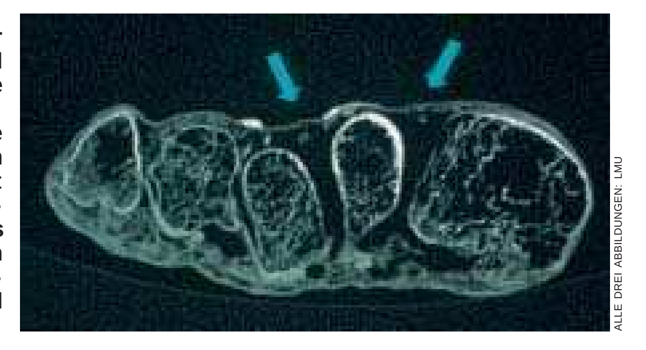
Diesem Fuß waren Zehen in der Linie der Grundglieder amputiert worden (links). Die Operationswunde heilte, ohne auffällige Narben zu hinterlassen. Die Röntgenaufnahme (unten) zeigt, dass der Strahl des kleinen Zehs noch vorhanden ist; er wurde vermutlich bei dem Eingriff übersehen, weil er nur klein ausgebildet ist und in Höhe des vierten Grundgelenks geendet haben dürfte.



BEIDE ABBILDUNGEN: LMU







Diesem rechten Fuß war der große Zeh amputiert und durch eine hölzerne Prothese ersetzt worden (oben links). Die Patientin überlebte, wie eine wulstige Umbaureaktion am Mittelfußknochen zeigt (oben rechts). Das Computertomogramm des Mittelfußes (rechts) verrät: Verkalkungen der Blutgefäße (weiß) hätten ohne Operation den Tod zur Folge gehabt.

ALLE DREI ABBILDUNGEN: LMU

Über die Wundbehandlung berichtet der erwähnte Papyrus Smith. Außer dem achsengerechten Einrichten von Brüchen sind darin verschiedene Verbände angeführt; die Bruchfixierung mit hölzernen Schienen wurde bereits erwähnt. Rohes Fleisch diente als anfängliche Wundauflage. Eine häufige und wichtige Komponente von Wundsalben war Honig, dessen adhäsive, reinigende und leicht antibiotische Wirkung sehr nutzbringend gewesen sein dürfte. Beispielsweise heißt es unter Fall 27 in diesem Papyrus: „Wenn du einen Mann mit einer Klaffwunde an seinem Kinn untersuchst, die bis zum Knochen reicht, dann sollst du seine Wunde abtasten. Wenn du seinen Knochen heil findest, dann sollst du sagen: Einer mit einer Klaffwunde an seinem Kinn, die bis zum Knochen reicht, hat eine Krankheit, die ich behandeln werde. Dann sollst du ihm zwei Binden auf jene Klaffen legen; du sollst ihn verbinden mit frischem Fleisch am ersten Tage, danach behandle sie mit Fett, Honig, Fasern an jedem Tage, sodass es ihm besser geht.“ Mit solchen Verfahren und Mitteln ist auch ein Abheilen von Operationswunden zu erreichen, wie insbesondere die von uns entdeckten Fälle von Amputationen zeigen.

Unseres Erachtens waren die altägyptischen Ärzte also sehr wohl zu erfolgreichen chirurgischen Eingriffen im Stande. Wenn es bisher nur wenige sichere Belege dafür gibt, mag das mit daran liegen, dass man Mumien und andere menschliche Relikte früher nicht sorgfältig genug paläopathologisch untersucht hat. Das ist allerdings auch wegen des unzureichenden Erhalts weicher Körperstrukturen schwierig, denn die zum Einbalsamieren verwendeten Substanzen haben die Haut und andere Gewebe erheblich verändert. Zudem dürften Wunden vielfach so gut verheilt sein, dass lediglich feine Narben zurückblieben, die – wie bei den beiden beschriebenen Amputationsstümpfen – nur sehr schwer zu erkennen sind.

Prof. Dr. Andreas Nerlich *leitet das Institut für Pathologie am Krankenhaus München-Bogenhausen. Die Untersuchung von Mumien ist einer seiner Forschungsschwerpunkte.*

PRECISION FARMING

Ackern auf den Meter genau

Viel Winterweizen ist gut, mehr davon ist besser. Mit GPS, Luftbildern und Computern sollen die Landwirte Schleswig-Holsteins künftig auf den Acker ziehen.

Von Peter Treue

Kühl und feucht sind nicht gerade Argumente für den Tourismus, doch Schleswig-Holsteins Getreideanbau profitiert von der rauen Witterung im Norden Deutschlands. Die fruchtbaren Parabraunerden und Lehmböden, die die letzte Eiszeit im östlichen Hügelland hinterlassen hat, tun das ihrige: Mit über neun Tonnen Winterweizen pro Hektar übersteigt der durchschnittliche Jahresertrag das Weltmittel um mehr als das Dreifache. Doch das Bessere ist stets der Feind des Guten, und so streben die Landwirte der Region danach, ihre Erträge weiter zu steigern, um dadurch im harten Wettbewerb mithalten zu können. Hilfe erhoffen sie sich auch von modernster Technik wie Satellitennavigation und Geo-Informationssystemen.

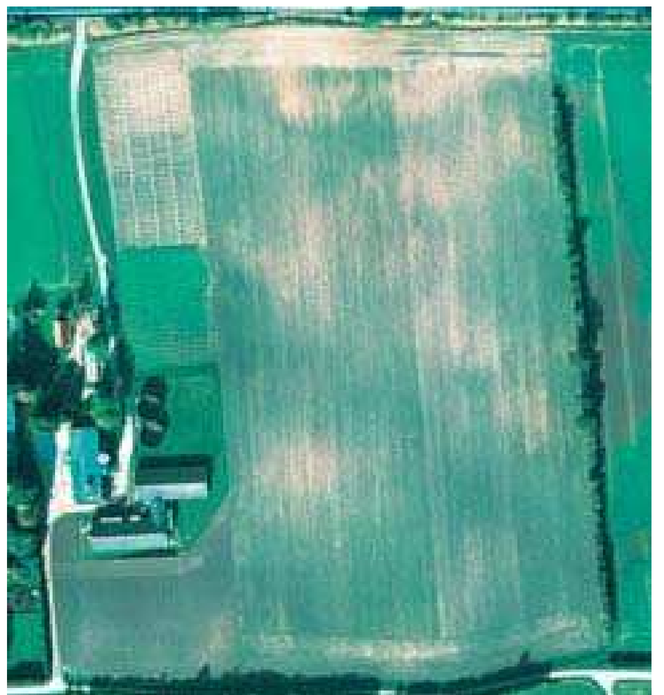
Das Thema hat allerdings noch eine andere Dimension als die der Wirtschaftlichkeit: Wenn es gelingt, die wichtigste Maßnahme zur Ertragsbildung, nämlich die mineralische Stickstoff-Düngung, den Erfordernissen eines jeden Ackers individuell anzupassen, ließe sich manche Überdüngung vermeiden, und es wanderte weniger Nitrat in das Grundwasser. Mehrere Institute der Christian-Albrechts-Universität in Kiel entwickeln deshalb seit nunmehr vier Jahren gemeinsam Verfahren für das so genannte *Precision Farming*, zu deutsch die „teilflächenspezifische Bewirtschaftung“.

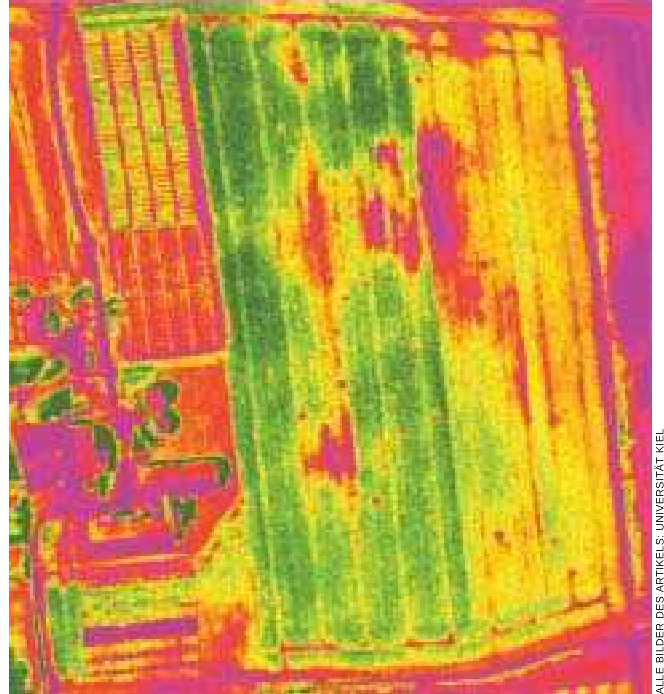
Heutige Äcker Schleswig-Holsteins umfassen gut und gerne 15 bis 30 Hektar. Wesentlich kleinere Flächen lassen sich mit den modernen Anbauverfahren kaum noch wirtschaftlich nutzen, von Nischenmärkten wie dem ökologischen Landbau abgesehen. Diese großen Flächen entstanden vor allem durch das Zusammenlegen kleinerer Parzellen im Rahmen von Flurbereinigungen. Doch die Qualität des Bodens und damit die Möglichkeiten der Pflanzenproduktion differieren innerhalb solcher Felder oft drastisch, besonders im östlichen Hügelland Schleswig-Holsteins. Niederschläge haben über die Jahre sehr humusreiche und tonige Bodenbestandteile in flache Senken gespült. Dort wächst das Getreide gut und kann noch Dünger aufnehmen, während wenige Meter daneben unter Umständen ein schwacher Sandboden das Gedeihen einschränkt. Überschüssiger Stickstoff wird dort vermehrt ausgewaschen, da Sandböden porös sind und ein geringes Wasserhaltevermögen haben – die Düngung muss auf diesen Flächen also reduziert werden.

Sichtkontakt zum Satelliten

Das Beispiel zeigt schon, dass vor der Planung einer differenzierten, kleinräumig orientierten Bewirtschaftung die Antwort auf eine einfache Frage stehen muss: Welchen lokalen Ertrag bringt der Boden auf Bereichen von wenigen hundert Quadratmetern? Wie viel Korn ein Mähdrescher wo erntet, lässt sich tatsächlich in kurzen Intervallen messen und gemeinsam mit der aktuellen Position speichern. Ein grafisches Informationssystem (GIS) bringt diese Angaben zusammen und erstellt metergenaue Karten des Ertrages. Diese Technik ist bereits erprobt und auf dem Markt, hat sich allerdings noch kaum durchgesetzt.

Dieses Luftbild eines Winterweizenfeldes (links) zeigt bereits im sichtbaren Wellenlängenbereich Unterschiede in der Pflanzendichte. Der Infrarotfilm (rechts) enthüllt bei geeigneter Auswertung feine Unterschiede der Grünfärbung und damit der jeweiligen Entwicklung. Die roten Farbtöne rechts zeigen Bestandslücken, verursacht durch Schädlingsbefall oder Staunässe.

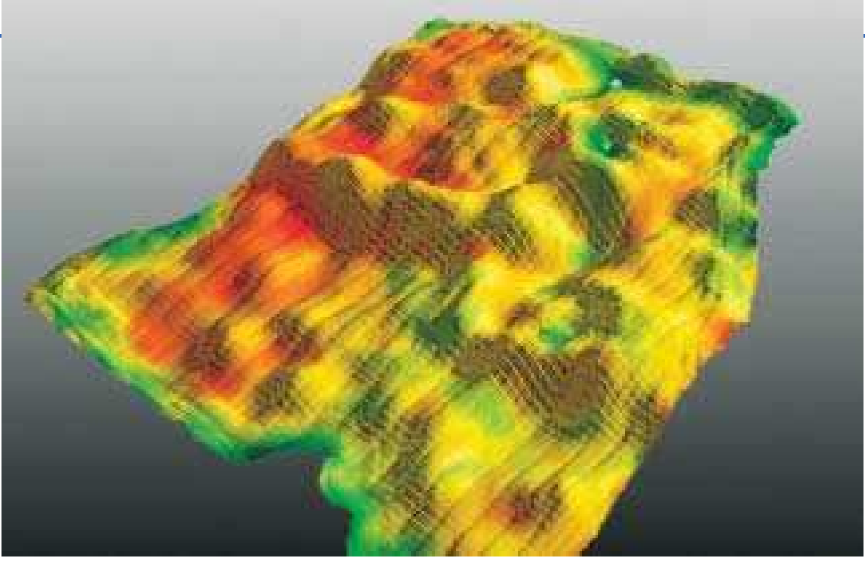




ALLE BILDER DES ARTIKELS: UNIVERSITÄT KIEL



In dieser Aufnahme zeigen sich deutliche Unterschiede des Bodens: Rote Flächen sind lehmig, gelbe sandig und grüne stellen geschützte Senken mit fruchtbarem Humus dar.



Diese Ertragskarte eines etwa dreißig Hektar großen Versuchsfeldes veranschaulicht auf dem Relief der Ackeroberfläche (rund dreifach überhöht) die lokale Fruchtbarkeit: Rote Farbtöne stehen hier für hohe, gelbe für mittlere und grüne für geringe Erträge.

Die geografischen Koordinaten der Landmaschine zu bestimmen, fällt heutzutage nicht weiter schwer: Sie trägt einen Empfänger, der die Signale der Satelliten des *Global Positioning Systems* (GPS) empfängt und auswertet. Wenigstens drei GPS-Satelliten müssen dazu im direkten „Sichtkontakt" liegen. In der Stadt oder im Gebirge sind diese Bedingungen nicht immer zu gewährleisten, in den fruchtbaren Küstenregionen Schleswig-Holsteins allemal. Dazu kommt ein Referenzsignal, das die Ortsmessung auf weniger als einen Meter genau macht. Man spricht dann von *Differential* GPS (DGPS). In Norddeutschland sendet der Küstenfunk dieses Korrektursignal. Auch zur automatischen Messung der aktuell in den Korntank einfließenden Getreidemenge gibt es serienreife Methoden: Sie messen beispielsweise über Piezosensoren die Kraft, die der Kornstrom beim Transport in den Korntank auf eine Prallplatte ausübt. Gleichzeitig wird der jeweils aktuelle Feuchtigkeitsgehalt des Korns gemessen und zur weiteren Auswertung gespeichert.

Ertragskarten spiegeln die Situation auf dem Acker allerdings erst im Anschluss an die produktive Zeit wider. Man kann sie auswerten und dabei Protokolle zur Düngung und Bodenbearbeitung einbeziehen, sofern die dafür eingesetzten Maschinen ebenfalls mit GPS und entsprechender Datenaufzeichnung ausgestattet waren. So erfährt der Landwirt mehr über die Struktur seines Ackers und kann für das nächste Jahr besser planen. Je mehr präzise Daten über die Teilflächen vorliegen, desto genauer können notwendige Modellrechnungen die Ertragsunterschiede in ihre Berechnungen einbeziehen. *Precision Farming* bedeutet deshalb in der Praxis derzeit vor allem Datenerfassung.

Ob die Planungen dann der realen Entwicklung entsprechen werden, lässt sich allerdings nur schwer vorhersagen, denn ein ganz entscheidender Faktor in der Pflanzenproduktion entzieht sich der langfristigen Prognose: die Witterung. Welche Regenmengen werden fallen und wann? Wie wird sich die Temperatur über die Wachstumszeit entwickeln?

Wissen, wo was wächst

Diese Variablen beeinflussen nicht nur die Pflanzen direkt, sondern wirken sich auch auf die Fruchtbarkeit des Bodens aus: Ein Lehmboden geht mit Regen anders um als ein Sandboden. Aus dem Grund wäre es wünschenswert, kurzfristig durch Messungen geeigneter Parameter die Modellrechnungen aktualisieren zu können. Nur dann lassen sich Maßnahmen wie die Düngung auf die Teilflächen und auf die jeweilige Witterung abgestimmt steuern.

Aktuelle Informationen zur Lage erfasst man am besten aus der Luft. Daher nahm das Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung in den Jahren 1999 und 2000 Serien von Luftbildern seiner Versuchsfelder auf. Auf handelsüblichem Dia- sowie auf Infrarotfilm dokumentierten wir verschiedene Vegetationsstadien von Winterweizen und auch von Raps. Die Bilder wurden mit Scannern digitalisiert, um sie in ein Geo-Informationssystem einzuspeisen. Dabei legten wir unterschiedliche Farbräume zu Grunde. Dias wurden nach den Koordinaten Farbton, Sättigung und Helligkeit eingelesen, denn im Bereich sichtbarer Wellenlängen interessierte uns nur der Farbton des Gebiets. Er gibt bereits Aufschluss darüber, ob eine Parzelle beispielsweise dicht bewachsen ist – sie erscheint dann dunkelgrün – oder einen Lehmanteil im Boden hat – nach einer Farbverstärkung zeigt das Bild dort rote Flächen (siehe Bild Seite 84).

Der Infrarotfilm wurde im RGB-(Rot, Grün, Blau)-System digitalisiert, das auch Bildschirmen zu Grunde liegt. Diese drei Farbkanäle entsprechen den drei Emulsionen des Films. Rot steht hier für den infraroten Wellenlängenbe- ▶



Ein solcher Düngerstreuer kann über hydraulische Schieber die ausgebrachte Menge genau und ortsabhängig regeln. Mit einem GPS-Empfänger und Bordcomputer ausgestattet, wäre er Teil eines *Precision-Farming*-Systems.

reich; Grünwerte werden bei diesem Falschfarbenmaterial durch den Kanal Blau repräsentiert. Durch Kombination beider Werte ließen sich sehr feine Unterschiede in der Grünfärbung von Pflanzen erkennen. Daraus konnten wir nicht nur auf ihre Versorgung mit Stickstoff schließen, sondern zu unserer Überraschung sogar auf Sortenunterschiede und unterschiedliche Behandlungen mit Pflanzenschutzmitteln.

Nach einer ersten Auswertung dieser Bilder wurden die Ergebnisse vor Ort überprüft und die Parameter der Auswerteverfahren den realen Zuständen angepasst. Eine Verifizierung auf dem Acker empfiehlt sich freilich auch später im praktischen Einsatz des Verfahrens an Referenzpunkten.

Insgesamt sind die Ergebnisse ermutigend. Im Rahmen der Versuche wurden Teilflächen aus Ertragskarten und Luftbildern abgegrenzt. Der Zusammenhang zwischen bestimmten Luftbildinformationen und den zu erwartenden Erträgen war über Jahre hinweg signifikant. Beispielsweise erfuhren wir so, dass eine bestimmte Region auf unserem Versuchsfeld jedes Jahr und unabhängig von der Frucht den mit Abstand höchsten Ertrag erbringt. Mit den Geo-Informationssystemen haben wir sie auf den Meter genau kartiert und abgegrenzt.

Durch optimierte Stickstoff-Düngung stieg der lokale Ertrag dort im Jahr 2000 auf fast 14 Tonnen pro Hektar. Gleichzeitig fuhren wir die Düngung auf den schwachen Arealen massiv zurück. Das Gesamtergebnis lautete: Zwischen drei und vier Prozent mehr Ertrag bei gleichzeitiger Reduzierung der Gesamt-Stickstoffmenge.

Natürlich hat dieser technische Aufwand seinen Preis, Schätzungen zufolge zwischen 8 und 23 Euro pro Hektar. Bei einem momentanen Weltmarktpreis von etwas mehr als 100 Euro pro Tonne Weizen müssen Mehrerträge von wenigstens 0,3 Tonnen pro Hektar bei gleich bleibendem Düngeaufwand garantiert werden. Wir glauben mit unserem Ansatz auf dem richtigen Weg zu sein. In der landwirtschaftlichen Praxis, fernab der Versuchsfelder, muss er sich allerdings noch bewähren.



Peter Treue *studierte Geologie in Bonn. Er promoviert zum Thema des Beitrags am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität Kiel.*

Am Rande

Fashion-Surfing

Noch ein Grund, warum das Internet nichts für Frauen ist, wohl aber für Männer

Kennen Sie den kleinen Unterschied zwischen Männern und Frauen? Die Anatomie? Fast richtig. Gravierend macht sich das Geschlecht nämlich dort bemerkbar, wo es darum geht, den Körperbau in edles Tuch zu hüllen. Denn Männer bevorzugen beim Kleidungskauf meist den Quickie – rein in den Laden, kaufen, raus aus dem Laden –, Frauen hingegen präferieren stundenlanges „Shopping“: Das prozedurale Verhalten ist dabei nicht unbedingt zielorientiert, ja nicht einmal unbedingt von einer Bestandslücke ausgelöst.

Kein Wunder also, dass der schnelle Modeverkauf via Internet laut Marktforschern bislang nur ein Prozent der potenziellen KäuferInnen erreicht. Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Arbeitsorganisation in Stuttgart resümieren zwar am Ende des EU-Projekts „Fashion Me“, die Zweidimensionalität der Bildschirmdarstellung sei an allem schuld. Doch ob ihr prototypisches 3D-Abbild in der virtuellen Umkleidekabine schon Frauen das artgerechte Online-Bummeln ermöglicht, sei bezweifelt. Allenfalls die integrierte Chat-Funktion könnte das ändern – die Umkleidekabine als Ort der Begegnung und der Kommunikation.

Uns Männern käme die Rationalisierung des Bekleidungs-Upgrades mittels Internet deutlich mehr entgegen, doch repräsentieren wir nur eine kleine Käuferschicht. Zu klären wäre auch, wer eigentlich den 3D-Laserscanner stellt, der den digitalen Stellvertreter meiner selbst erzeugt, auf dass sich dieser „Avatar“ im Netz der Qual der Wahl stelle? „Ihr digitales Abbild für fünf Euro!“ – vorerst nur ein Wunschtraum?

Auf jeden Fall böte es uns Männern erhebliche Vorteile. Als Internet-Agenten könnten modebewusste Avatare das lästige K(leider)-Thema gleich ganz übernehmen. So sparten wir noch mehr Zeit, die dem Kampf ums Überleben in einer postmodernen, postsozialen, postfeministischen Gesellschaft zugute käme. Abends kurz den Browser gestartet – „Brauche neue Hose, Cord, Stretch“ – und am Morgen meldet der PC Vollzug: „You've got new trousers!“ Das wäre wirklich Freiheit dank Technik.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Artgerechtes Shopping dank 3D-Animationen? Näheres zum Thema unter www.fashion-me.com

TEXTILIEN

Aprilfrische Bären

Spielzeug, das gut duftet, Kleidung, die Schweißgeruch absorbiert oder Medikamente abgibt – spezielle Zuckermoleküle machen es möglich.

Von Hans-Jürgen Buschmann

Wer kennt nicht das Naserümpfen, wenn die Kleidung nach Schweiß, Rauch oder Essen riecht. Ein Besuch im Restaurant, die Fahrt in der Straßenbahn oder ein schlichter Tag im Büro erzwingen oft schon, das Hemd, den Pullover zu waschen. Cyclodextrine genannte ringförmige Zuckermoleküle könnten dem künftig abhelfen. Ihre Stärke: Im Wasser abweisenden Innern des Ringes können sie diverse Substanzen binden, darunter auch übel riechende Moleküle. Andererseits lassen sich Duftstoffe oder pharmazeutische Wirkstoffe in diese Hohlräume einbringen, die dann umgekehrt im Laufe der Zeit freigesetzt werden.

Diese Funktion als vorübergehenden Speicher nutzt bereits die Lebensmittelindustrie: Seit November 2000 ist Beta-Cyclodextrin als Zusatzstoff E 459 in Deutschland zugelassen. Es sperrt leichtflüchtige Aromastoffe in seinem Innern ein. So bewahrt Fertigsuppenpulver lange seinen Geschmack. Erst bei der Zubereitung mit Wasser werden die Aromastoffe wieder frei. Wie sehr die Komplexbildung mit dem Ringzucker die physikalischen Eigenschaften des zu speichernden Stoffes verändert, demonstriert eindrucksvoll das Nitroglyzerin: Im Verein mit Cyclodextrin verträgt es Hitze und Stoß.

Weil diese speziellen Zuckermoleküle durch enzymatischen Abbau von Stärke gewonnen werden, fallen sie in die Kategorie „nachwachsende Rohstoffe“, was ihre Attraktivität für die Vermarktung noch steigert. Seit etwa zehn Jahren entwickeln Chemiker des Deutschen Textilforschungszentrums Nord West e. V., einem Institut der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, deshalb Verfahren, Cyclodextrine auf textilen Fasern zu fixieren. Mittlerweile haben sie, finanziell gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), einige Methoden zur industriellen Reife gebracht.

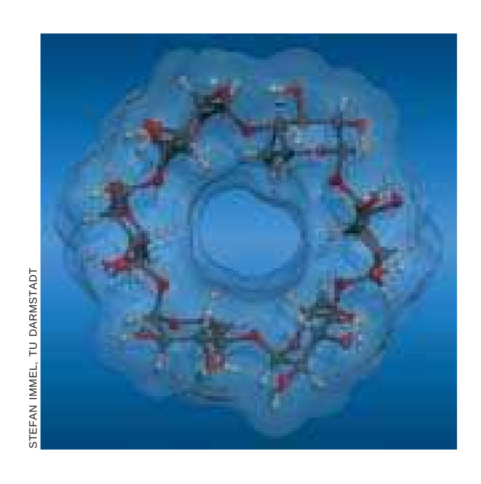
Beispielsweise fixieren die Wissenschaftler das Ringmolekül auf Baumwollfasern, indem sie ihm eine chemische Gruppe anhängten, die mit der Zelluloseoberfläche reagiert. Da es sich um chemische Bindungen handelt, bleiben die Zuckermoleküle auch nach dem Waschen auf der Faseroberfläche. Alles was sich im Innern des Ringmoleküls befindet, wird jedoch nach und nach herausgelöst. Andere Fasern erfordern auch eine andere Strategie. So lassen sich Cyclodextrine auf unpolarem Polyester nur mechanisch verankern: Ein langer, ebenfalls unpolarer Rest am Ringmolekül wandert in die Faser hinein und verhakt sich sozusagen zwischen deren Polyesterketten.

Experimente bestätigten die vielseitige Anwendbarkeit, die vom lange geruchsfreien T-Shirt bis zum textilen Hormonpflaster reicht. Eine Reizung der Haut durch die verwendeten Derivate des ringförmigen Zuckers lässt sich nach Versuchen ausschließen. Eines der ersten Produkte ist bereits auf dem Markt: Stoffbären der Firma BärenWelt können mit Parfüm besprüht werden und geben den Duftstoff erst bei Berührung durch die auf der Hautoberfläche befindliche Feuchtigkeit wieder ab.

Oberbekleidung, die auch nach einem Kneipenbesuch frisch riecht, und Gardinen, die die Luft in Büros von unangenehmen Gerüchen befreien, gibt es bereits. Viel mehr ist denkbar, auch pharmazeutische Anwendungen: Unterwäsche, die beim Tragen hautpflegende Substanzen freisetzt, wird ebenso ihren Markt finden wie Bettwäsche, die Eukalyptus oder Menthol verströmend dem Erkälteten zur Nachtruhe verhilft. ■

Der promovierte Chemiker **Hans-Jürgen Buschmann** *leitet die Gruppe „Supramolekulare und Polymerchemie“ am Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West e.V. in Krefeld.*

Die Alpha-Variante von Cyclodextrin misst außen 1370, innen 500 Picometer (weiß: Wasserstoff; grau: Kohlenstoff; rot: Sauerstoff).



STEFAN IMMEL, TU DARMSTADT



Bären zum Knuddeln und Riechen: Ringförmige Zuckermoleküle im Kunstfell speichern Duftstoffe.

WALTER KLEIN, BÄRENWELT

METALLURGIE

Karosserie aus dem Computer

Wie sich ein Blech optimal in Form bringen lässt, simuliert ein neues Verfahren genauer und schneller, als bisherige es vermochten.

Von Roland Wengenmayr

Metalle zeigen unter Last ein sehr komplexes Fließverhalten, wie die Umformung eines Aluminiumblechs zum Napf zeigt: Sein Rand stülpt sich zu unerwünschten Zipfeln aus. Beim Pressen von kompliziert geformten Metallteilen, etwa Kotflügeln, kann das gravierende Fehler zur Folge haben: Das Metall wird in manchen Bereichen zu dick oder zu dünn oder quillt an Stellen, die kaum nachbearbeitet werden können; unter Umständen bildet seine Oberfläche eine „Rinde" anstatt glatt zu glänzen.

Das zwingt die Autoindustrie bei jedem neuen Fahrzeugtyp zu einer aufwendigen Entwicklung neuer Presswerkzeuge, mit der die Fahrzeugteile produziert werden. „Pro Werkzeug kostet das zwischen 7,5 und 25 Millionen Euro", so Dierk Raabe, geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung in Düsseldorf. „Und dennoch gibt es in der monatelangen Anlaufphase einer neuen Produktion durchaus 30 bis 40 Prozent Ausschuss!" Dabei setzen die Autohersteller in der Entwicklung bereits aufwendige Simulationssoftware ein, um die hohen Kosten zu reduzieren. Die Düsseldorfer Forscher haben nun ein neues, für die Industrie geeignetes Verfahren entwickelt, welches das Fließverhalten realistisch simulieren kann.

Kristalle unter Druck

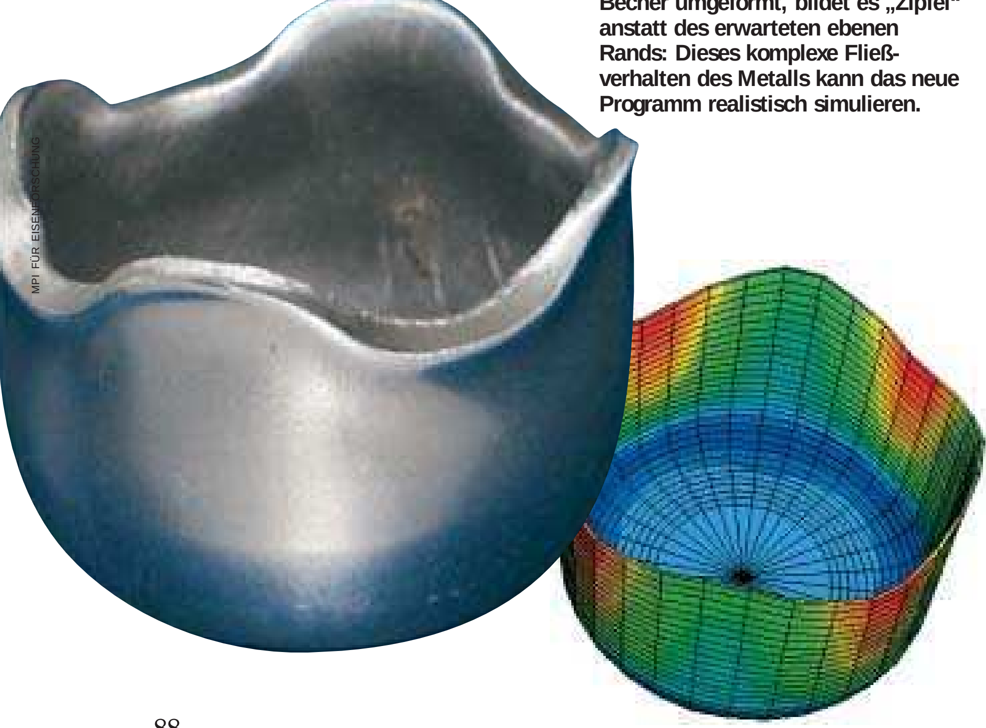
Metalle bestehen aus vielen winzigen Kristallen, die sich beim Erstarren aus der Schmelze bilden. Jeder davon ist wie ein Sandwich aus parallelen Atomlagen aufgebaut. Sein Atomgitter ist deshalb in eine Richtung orientiert. Beim Umformen geraten diese Kristalle unter Druck: Sie rotieren und verformen sich, wegen der Sandwichstruktur aber nur in Vorzugsrichtungen. Deshalb fließt das Metall nicht gleichmäßig wie ein zäher Sirup, sondern dehnt sich bevorzugt in bestimmte Richtungen aus. Im Halbzeug – das sind Bleche, wie sie die Automobilindustrie weiterverarbeitet – hat das Auswalzen einen Teil der Kristalle bereits parallel ausgerichtet. Solche Bleche fließen noch ungleichmäßiger, wenn sie in eine Form gepresst werden.

Herkömmliche Simulationsprogramme der Autoindustrie berücksichtigen diese Mikrostruktur nicht. Deshalb können sie nur realistische Ergebnisse erzielen, wenn sie mit empirischen Daten gefüttert werden. Die wiederum stammen aus zahlreichen, kostspieligen Testreihen mit Prototypen des neuen Presswerkzeugs. Das resultierende Rechenmodell gilt dann auch nur für von diesem Werkzeug hergestellte Bauteile.

Metallforscher verwenden hingegen schon länger Programme, die das Verhalten jedes individuellen Kristalls im Metall nachbilden. So können sie beliebige Umformungen realistisch simulieren. Allerdings beanspruchen diese Verfahren Wochen an Rechenzeit – ein Werkstück besteht immerhin aus mehreren Millionen Kristallen. Für die Industriepraxis ist das viel zu lang.

Die Düsseldorfer Metallforscher haben ein neues Verfahren entwickelt, das diese Rechenzeiten um das Hundert- bis Fünfhundertfache reduziert, ohne an Genauigkeit zu verlieren. Die neue „Texturkomponenten-Kristallplastizitäts-Finite-Elemente-Methode" nutzt dazu ein ausgeklügeltes mathematisches Verfahren. Es fasst jeweils gleich orientierte Kristalle in Gruppen, so genannten Texturkomponenten zusammen und modelliert deren Verhalten. Weil sie damit die Mikrostruktur berücksichtigt, kann diese Modellierung sogar entsprechende Daten der Blechhersteller verarbeiten, die durch Röntgenbeugung routinemäßig gewonnen werden.

Führende Auto- und Halbzeughersteller zeigen starkes Interesse an dem Softwarepaket aus Düsseldorf. Es könnte die Kosten für die Entwicklung neuer Fahrzeuge im Bereich der Werkstoffbearbeitung drastisch reduzieren. Derzeit testen einige Unternehmen nun die Integration des Pakets in ihre Fahrzeugentwicklung, dazu gehört auch die Simulation von Verformungsprozessen in Crash-Tests. ■


MPI FÜR EISENFORSCHUNG

Wird ein Metallblech zu einem Becher umgeformt, bildet es „Zipfel" anstatt des erwarteten ebenen Rands: Dieses komplexe Fließverhalten des Metalls kann das neue Programm realistisch simulieren.

*Der Physiker **Roland Wengenmayr** ist Reakteur von „Physik in unserer Zeit" und freier Wissenschaftsjournalist.*

SENSORIK

Nützlicher Schnüffler in der Luft

Wissenschaftler des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) haben ein kleines heliumgefülltes Luftschiff zu einem fliegenden Umweltschützer umgerüstet. Bei Lena (Luftschiff mit elektronischer Nase) handelt es sich um einen knapp acht Meter langen ehemaligen „Werbezeppelin", der für die Überwachung von Gefahrenzonen etwa auf Betriebsgeländen mit einer Videokamera und einem Gasdetektor ausgestattet ist, der so genannten Karlsruher Mikronase (kurz Kamina). Sie enthält als Herzstück einen etwa pfenniggroßen Chip mit 38 Gassensorsegmenten, die von einer kleinen Heizschlange auf der Chiprückseite auf 300 bis 350 Grad Celsius erhitzt werden. Jedes der Segmente reagiert durch variierende Oberflächentemperatur und verschieden dicke Beschichtung aus Siliziumdioxid unterschiedlich.



Die fliegende Nase Kamina

FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Ob im Dauerbetrieb oder in Sondereinsätzen – in jedem Fall muss der Chip auf die zu erkennenden Gase „trainiert" werden. Schadstoffe und Luftgemische lassen sich anhand charakteristischer Muster in einem zweidimensionalen Diagramm erkennen. So sind beliebige Luftanalysen bis hin zum Nachweis giftiger Gase im Ausstoß von Fabrikschornsteinen möglich. Ein Saugrohr an der Unterseite des Luftschiffs – etwa mit einem Teleskoparm – soll das Ansaugen beim Schweben über dem Erdboden erleichtern. Damit soll Lena auch zur Minensuche im Kosovo taugen.

TUNNELBAU

Brandfester Beton

Herkömmlicher Beton hält die extremen Temperaturen bei Tunnelbränden selten aus. Neben chemischen Veränderungen ist es vor allem das im Beton enthaltene Wasser, das die größten Zerstörungen verursacht: Sein Volumen steigt beim Verdampfen etwa um das Tausendfache an und damit wächst die Druckbelastung, die sich schließlich durch Abplatzen des Betons schlagartig entlädt. Dabei können auch die Stahlarmierungen freigelegt werden. Ungeschützt den hohen Temperaturen ausgesetzt verlieren sie ihre Tragfähigkeit, was zum Einsturz ganzer Tunnelabschnitte führen kann.

Volker Wetzig vom Versuchsstollen Hagerbach in der Schweiz ist es nun in Zusammenarbeit mit der Industrie gelungen, einen besonders brandbeständigen Beton zu entwickeln. Er enthält zum einen Polypropylenfasern, die gewissermaßen als Überdruckventil dienen, denn sie schmelzen im Brandfall und schaffen so



Feuertaufe für neuen Beton

AQUASYS TECHNIK GMBH

Kanäle, über die der Wasserdampf entweichen kann. Zum anderen ersetzt eine bei 1350 Grad Celsius gesinterte und besonders hitzebeständige Flugasche der niederländischen Firma Memarco den Kies als Zuschlagsstoff im Beton. Damit fällt die Temperatur unter der Oberfläche wesentlich rascher ab, sodass die dort liegenden Metallarmierungen weniger beeinträchtigt werden.

Erste Versuche mit dem brandfesten Beton verliefen viel versprechend. In Hagerbach wird nun an einer spritzfähigen Variante des Betons gearbeitet, die für den Neubau von Tunneln geeignet ist.

DISPLAY

Bildschirm zum Zusammenrollen

Displays, welche die Vorteile von Papier und elektronischen Anzeigen vereinen, könnten der täglichen Papierflut ein Ende bereiten. Doch noch immer bereitet die Entwicklung von „elektronischem Papier" große Schwierigkeiten. Denn schließlich soll es in Massen günstig fertigbar sein und sowohl Schrift als auch schnelle Bildsequenzen auf einer möglichst großen und flexiblen Fläche kontraststark wiedergeben können.

Edzer Huitema und seine Kollegen von der Philips-Forschungsabteilung in Eindhoven haben nun auf dem Weg dahin einen wichtigen Erfolg erzielt. Sie entwickelten erstmals ein funktionsfähiges Display mit 64 mal 64 Bildpunkten und 51 Millimetern Bilddiagonale auf Polymerbasis, das 256 Graustufen anzeigen kann. Der maximale Kontrast ist dabei nach Aussage der Forscher ebenso gut wie bei bedrucktem Papier.

Jedes der 4096 Pixel wird einzeln über einen Dünnschichttransistor mit einer aktiven Schicht aus halbleitenden Polymeren über einer reflektierenden Goldschicht angesteuert. Je nach angelegter Spannung verändern in der Polymerschicht eingelagerte Flüssigkristalle ihre Lichtdurchlässigkeit. Dabei lässt sich das zusammengesetzte Gesamtbild bis zu hundertmal pro Sekunde erneuern, das ist wesentlich schneller als bei herkömmlichen Flüssigkristallanzeigen (LCD). Gegenüber gängigen Flachbildschirmen erlaubt das neue Display auch einen ungestörten Blick von der Seite, da es ohne polarisiertes Licht auskommt.

Die verwendeten Halbleiterpolymere lassen eine kostengünstige Massenfertigung zu, denn sie kommen ohne aufwendige Vakuumtechnik aus, wie sie bei der Produktion von Halbleiterelektronik nötig ist. Auch wenn der Prototyp noch zwischen zwei Glasplatten eingebettet ist, kann das Display grundsätzlich auch zwischen transparenten und flexiblen Folien gelagert werden. *(Nature, Bd. 414, S. 599)*



Kein Wolf im Schafspelz: das neue Kunststoff-Display

EDZER HUITEMA ET AL./ PHILIPS RESEARCH LABORATORIES

P.A.L.M. Microlaser Technologies AG

Lichtspiele unter dem Mikroskop

Wenn Harry Potter auf seinem Besen durch die Luft schwebt, um im richtigen Moment beim Quidditch-Spiel einzugreifen, dann stecken leider nur Filmtricks dahinter. Wenn lebende Zellen zu schweben beginnen und auf dem Objektträger eines Mikroskops umherwandern, ist vermutlich etwas wirklich Magisches der Grund: ein Teppich aus Licht. Genauer gesagt, ein Laser-System von P.A.L.M. Microlaser Technologies, integriert in ein herkömmliches Forschungsmikroskop.

Der Laserstrahl wird in dessen Strahlengang eingespiegelt, die Optik fokussiert ihn auf einen nicht einmal einen Mikrometer Durchmesser großen Brennfleck in der Ebene des betrachteten Objekts. Die durch den gebündelten Laserstrahl induzierten Kräfte reichen aus, um lebende menschliche, tierische und pflanzliche Zellen zu transportieren, einzufangen und auf dem Objektträger zu bewegen, aufzuschneiden oder mit anderen zu fusionieren.

Die MicroTweezers genannten optischen Pinzetten fangen und halten solche mikroskopisch kleinen Objekte mittels eines infraroten Laserstrahls. Die Wellenlänge ist dabei so gewählt, dass die interessierenden Zellen das einfallende Licht kaum absorbieren. Sie brechen es aber auf Grund ihrer vom umgebenden Medium verschiedenen optischen Dichte, wodurch sich der Impuls der Photonen ändert. Gegenkräfte suchen dies zu kompensieren. Der Effekt: Die Zellen werden zum Brennpunkt gezogen und dort gehalten. Bewegt man Laserfokus oder Mikroskop-Tisch, so folgen die Teilchen den Bewegungen.

Das zweite Manipulationswerkzeug ist ein MicroBeam genanntes Laserskalpell. Es nutzt einen gepulsten Stickstofflaser mit einer Wellenlänge von 337 Nanometer (UV-A). Mit der Fokusgröße von ebenfalls weniger als einem Mikrometer schneidet er feinste Schneisen in das Biomaterial. Dabei werden extrem viele Lichtteilchen (Photonen) in kürzester Zeit (drei Nanosekunden) in den Molekülen platziert, wobei chemische Bindungen aufbrechen. Diesen Vorgang nennt man Photozersetzung oder auch Photodekomposition. Sowohl die Probe selbst als auch umliegende Regionen bleiben dabei intakt – die Schnittkante verläuft glatt. Dieses System kann beispielsweise bei der künstlichen Befruchtung menschlicher Eizellen helfen: Es schneidet die Geißeln der Spermien ab und macht sie so unbeweglich. Das Skalpell öffnet anschließend ein winziges Loch in der Membran einer Eizelle; per Lichtstrahl kann der Samen dort eingebracht werden.

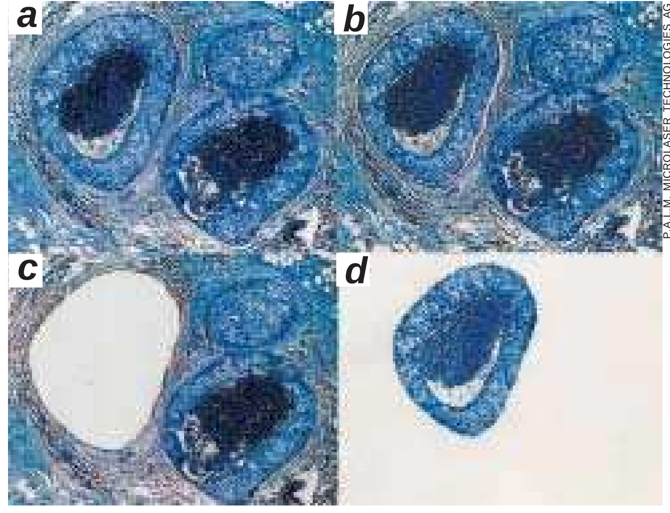
Zur Gewinnung von Zellarealen, einzelnen Zellen oder Chromosomen aus biologischen Präparaten verwendet man herkömmlich Glasnadeln, Glaspipetten oder einen Laser, der die gewünschten Proben auf eine spezielle Haftmembran schmilzt. Verunreinigungen oder Schäden am Objekt lassen sich aber dabei nicht immer vermeiden. Molekulare Untersuchungsmethoden wie PCR (Polymerase-Kettenreaktion) sowie Verfahren zur DNA- oder Protein-Analyse erfordern jedoch hochgradig reines und intaktes Probenmaterial. P.A.L.M. brachte als Erster ein Verfahren auf den Markt, mit dem sich Zellmaterial berührungslos sammeln lässt: das *Laser Pressure*


P.A.L.M. MICROLASER TECHNOLOGIES AG

Als die Zellen fliegen lernten: *Laser Pressure Catapulting* macht's möglich.


P.A.L.M. MICROLASER TECHNOLOGIES AG

Per Joystick und zwei Druckknöpfen wird über dem Präparat ein Auffanggefäß für Zellen positioniert. Mit der Maus lassen sich diese auf dem Monitor markieren (hier: menschliche Darmzellen), ausschneiden und dann die Laserpulse auslösen.



P.A.L.M. MICROLASER TECHNOLOGIES AG

Aus diesem Präparat eines Brustkrebsgewebes (*a*) schnitt der Laser ein Zellareal aus (*b*), das dann herauskatapultiert wurde (*c*) und in einem Auffanggefäß landete (*d*).

Catapulting. Ein drei Nanosekunden kurzer Laserpuls katapultiert dabei die Zelle oder das Chromosom in Sekundenbruchteilen über mehrere Millimeter hinweg vom Objektträger sicher in ein Auffanggefäß. Dabei wird das Zielobjekt mit dem leicht aufgeweiteten Laserstrahl richtiggehend herausgeschleudert. Der gesamte Vorgang lässt sich mit dem Computer planen und steuern.

Je genauer Zellen aus morphologisch definierten Bereichen herausgeschnitten und isoliert werden können, desto präzisere Aussagen beispielsweise zum Verlauf einer Krebserkrankung sind möglich und desto wahrscheinlicher sind neue Erkenntnisse zur Zellentwicklung und -differenzierung. Die Manipulation mit dem Laserskalpell eröffnet nicht nur der In-Vitro-Fertilisation oder Präimplantationsdiagnostik bessere Chancen, auch für die pharmazeutische Forschung ist sie geeignet: Durch winzige Löcher in der Zellmembran lassen sich Wirkstoffe ohne weitere Transportmittel direkt einschleusen. Kurz: Der gebündelte Laserstrahl avanciert zum Universalwerkzeug.

Ulrike Zechbauer

Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin in München.

Das Unternehmen im Profil

Die Biologin Dr. Karin Schütze und ihr Mann Raimund gründeten 1993 P.A.L.M. Microlaser Technologies (*Positioning and Ablation with Laser Microbeams*). Im August 2000 wurde die Firma mit Sitz in Bernried am Starnberger See in eine AG umgewandelt. Das Aktienkapital beträgt mittlerweile knapp drei Millionen Euro. Heute gehört P.A.L.M. vor allem dank des patentgeschützten *Laser Pressure Catapulting* zu den Marktführern im Bereich Laser-Mikrodissektion weltweit. Für das Geschäftsjahr 2002 erwartet die AG, die derzeit rund vierzig Mitarbeiter hat, einen Umsatz von 13 Millionen Euro. P.A.L.M. kooperiert weltweit mit der pharmazeutischen Industrie und insbesondere mit Universitäten und Forschungsinstituten wie dem amerikanischen National Institute of Health in Bethesda/USA, dem Tokyo Cancer Research Center und dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

Weitere Informationen unter *www.palm-microlaser.com*



NUKLEARWAFFEN

Indien, Pakistan und die Bombe

Beide Staaten rüsten sich seit langem mit Nuklearraketen für eine militärische Auseinandersetzung. Durch den Anschlag auf das indische Parlament eskalierten die Spannungen bis an den Rand eines Krieges der beiden Atommächte.

Von Michael Springer

Seit die USA auf den Terroranschlag vom 11. September 2001 gegen Pentagon und World Trade Center mit einer Militäraktion gegen die Taliban in Afghanistan reagierten, sind der gesamte Mittlere Osten und der indische Subkontinent zur hochbrisanten Krisenregion geworden. Afghanistans Nachbar Pakistan diente den Taliban stets als Rekrutierungs- und Rückzugsgebiet, und der pakistanische Staatschef Musharraf regiert ein Land, dessen Bevölkerung teilweise offen mit den islamistischen „Gotteskriegern“ sympathisiert. Entsprechend geschwächt ist sein Regime, seit er offiziell mit den Taliban brach und sich dem „internationalen Kampf gegen den Terrorismus“ anschloss.

In dieser instabilen Lage fühlten sich aus Pakistan stammende muslimische Extremisten offenbar ermutigt, mit einer spektakulären Terroraktion gegen den Erzfeind Indien loszuschlagen, der seit jeher mit Pakistan um die Grenzregion Kaschmir streitet. Um ein Haar hätten die Attentäter am 13. Dezember Hunderte indische Abgeordnete ausgerottet, die gerade im Parlament von Neu-Delhi tagten. Nun balancieren beide Staaten am Rande eines großen militärischen Konflikts, der letztlich sogar in einen Nuklearkrieg ausarten könnte – denn nicht nur Indien, sondern auch Pakistan verfügt über Kernwaffen.

Beide Länder treiben praktisch seit 1947 (dem Jahr der Unabhängigkeit von Großbritannien) eigene Nuklearprogramme voran, die im Wesentlichen auf – teils unter der Hand beschaffter – westlicher Technologie beruhen. Schon Indiens erster Premier Nehru forcierte die Entwicklung indischer Kernreaktoren für friedliche Zwecke, fügte aber hinzu: „Falls wir als Nation gezwungen werden, Atomenergie für andere Zwecke einzusetzen, werden uns wohl keine frommen Gefühle daran hindern.“ Bald fühlte Indien sich vom nördlichen Nachbarn China nuklear bedroht: Nach der Niederlage im Grenzkrieg gegen China 1962 und dem ersten chinesischen Nukleartest 1964 gab Indien grünes Licht für die Entwicklung einer eigenen Bombe. Der theoretische Physiker Homi Bhabha, Leiter der Indischen Atomenergiekommission, behauptete, das sei „binnen 18 Monaten“ zu schaffen. Doch erst zehn Jahre später, am 11. Mai 1974, detonierte eine indische Plutonium-Waffe, deren Explosivkraft in etwa der amerikanischen Hiroshima-Bombe entsprach.

Im Jahre 1983 forcierte die indische Premierministerin Indira Gandhi ein Programm zur Entwicklung von ballistischen Raketen und Lenkwaffen. Der Raketenantrieb beruhte auf sowjetischer Technologie aus den sechziger Jahren; Gyroskope, Beschleunigungsmesser und Bewegungssimulatoren kaufte man bei Firmen aus Frankreich, Schweden, den USA und Deutschland.

„1988 testete Indien seine erste Boden-Boden-Rakete kurzer Reichweite“, berichtet der indische Physiker und Konfliktforscher M. V. Ramana, der an der Princeton University lehrt und die Indische Vereinigung für nukleare Abrüstung und Frieden mitbegründete: „Ein Jahr später kam eine Rakete mittlerer Reichweite, im April 1999 eine, die immerhin 2000 Kilometer weit fliegen kann – bis tief in chinesisches Gebiet hinein.“ Indiens militärische, Plutonium produzierende Reaktoren haben bisher Material für fünfzig bis hundert Sprengköpfe geliefert. Allerdings könnte dieses Arsenal, wie Ramana einräumt, auch erheblich größer sein, falls Indiens „friedliche“ Kernreaktoren nicht nur Strom produzieren, sondern auch Plutonium für Waffen.

Pakistan versuchte hartnäckig, mit dem größeren Nachbarn Indien nuklear gleichzuziehen: 1965 nahm der erste Forschungsreaktor den Betrieb auf, 1970 das erste kommerzielle Kernkraftwerk. Der theoretische Physiker Abdus Salam (Nobelpreis 1979) spielte dabei von Anfang an eine wichtige Rolle als Regierungsberater.

Nach dem zweiten Kaschmir-Krieg mit Indien von 1965 – der erste brach bereits unmittelbar nach der Unabhängigkeit aus und endete mit der bis heute prekären Teilung Kaschmirs zwischen Indien und Pakistan – drängten viele pakistanische Politiker und Wissenschaftler auf die Entwicklung eines nuklearen Waffenarsenals. Der damalige Außenminister Zulfikhar Ali Bhutto erklärte: Falls Indien eine Atombombe entwickle, werde Pakistan das auch tun, „selbst wenn wir Gras und Blätter essen oder hungrig bleiben müssen“. Nach der Niederlage im dritten indisch-pakistanischen Krieg im Dezember 1971 – er endete mit der Abtrennung Ost-Pakistans, das sich seither Bangladesh nennt – wurde Bhutto



Triumphierend fahren Pakistanis nach den ersten Nukleartests im Mai 1998 die Attrappe einer „islamischen Atombombe“ durch die Straßen.

Premierminister; im Januar 1972 gab er den Auftrag zum Bau der Bombe.

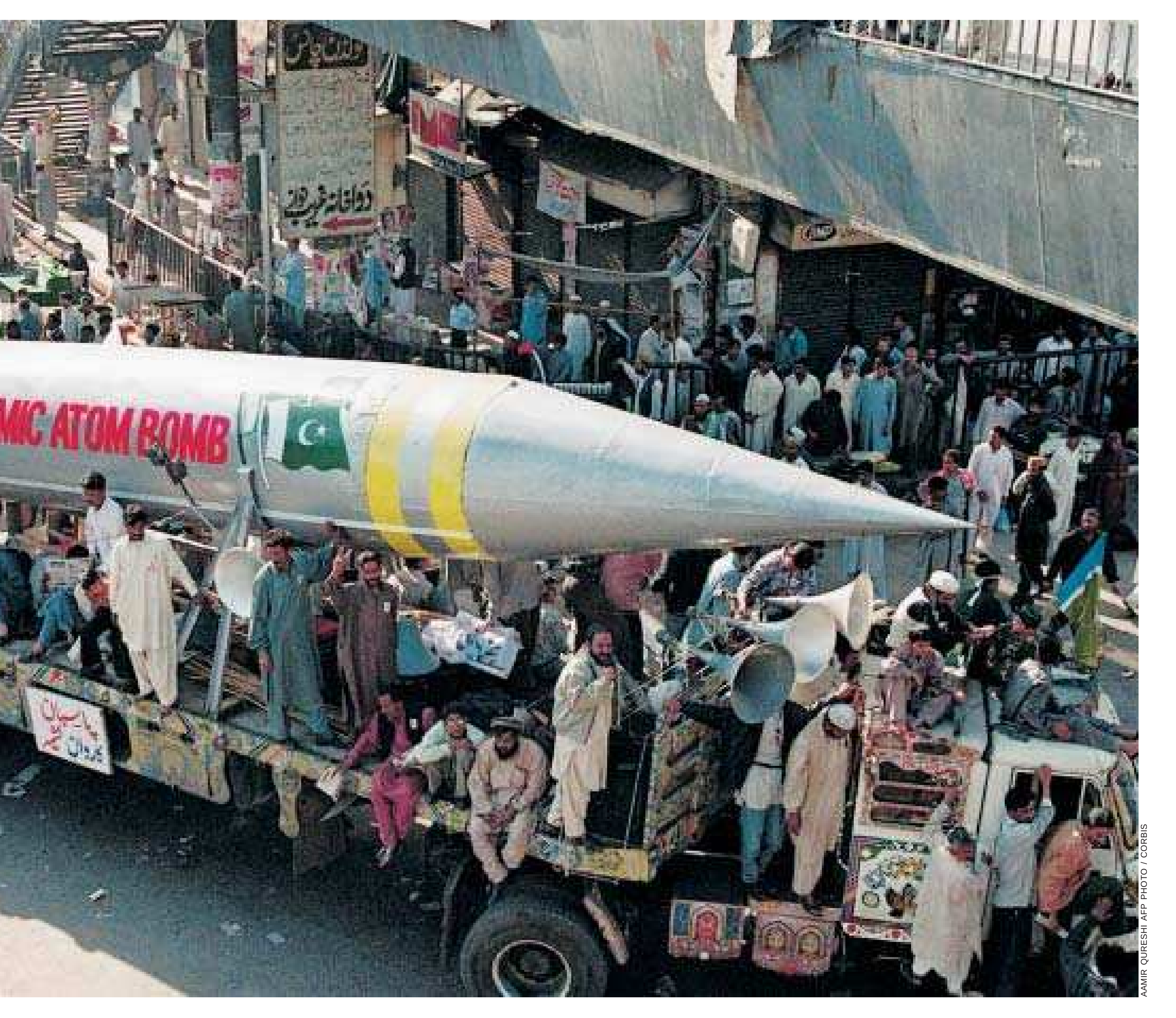
Wie A. H. Nayyar, Physik-Professor an der Quaid-e-Azam-Universität in Islamabad (Pakistan) und Mitbegründer der Pakistanischen Friedensvereinigung, zu berichten weiß, verfolgten die pakistanischen Forscher eine Doppelstrategie. Einerseits versuchten sie, von Frankreich fertige Plutonium-Wiederaufbereitungsanlagen zu kaufen. Nachdem Frankreich unter amerikanischem Druck den Handel platzen ließ, gingen einige pakistanische Wissenschaftler nach Belgien, verschafften sich dort das nötige Know-how und konstruierten in Pakistan Anfang der achtziger Jahre eine kleine Versuchsanlage. Dieses Labor ist fähig, aus dem verbrauchten Brennmaterial eines seit 1998 betriebenen Reaktors jährlich das für zwei bis vier Bomben nötige Plutonium zu erzeugen.

Andererseits erforschten die Wissenschaftler Techniken zur Anreicherung des bombentauglichen Uran-Isotops U-235. Die zentrale Figur war hierbei A. Q. Khan, ein pakistanischer Metallurg, der bis 1975 in einer niederländischen Anreicherungsanlage gearbeitet hatte.

Der Feind meines Feindes ist mein Freund

Er brachte geheime Konstruktionspläne heim sowie Kontakte zu westlichen Lieferanten, die bereit waren, geltende Ausfuhrregelungen zu verletzen. Seit 1979 hat Pakistan, so Nayyar, auf diese Weise angereichertes Uran für schätzungsweise zwanzig bis vierzig Bomben produziert, und pro Jahr kommt Material für vier bis sechs Bomben hinzu. Außerdem sprechen unbestätigte Indizien dafür, dass China – das nach der Devise „Der Feind meines Feindes ist mein Freund“ Pakistan gegen Indien zu unterstützen pflegt – dem kleineren der beiden Streithähne bei der Entwicklung der Technik für nukleare Raketen unter die Arme gegriffen hat.

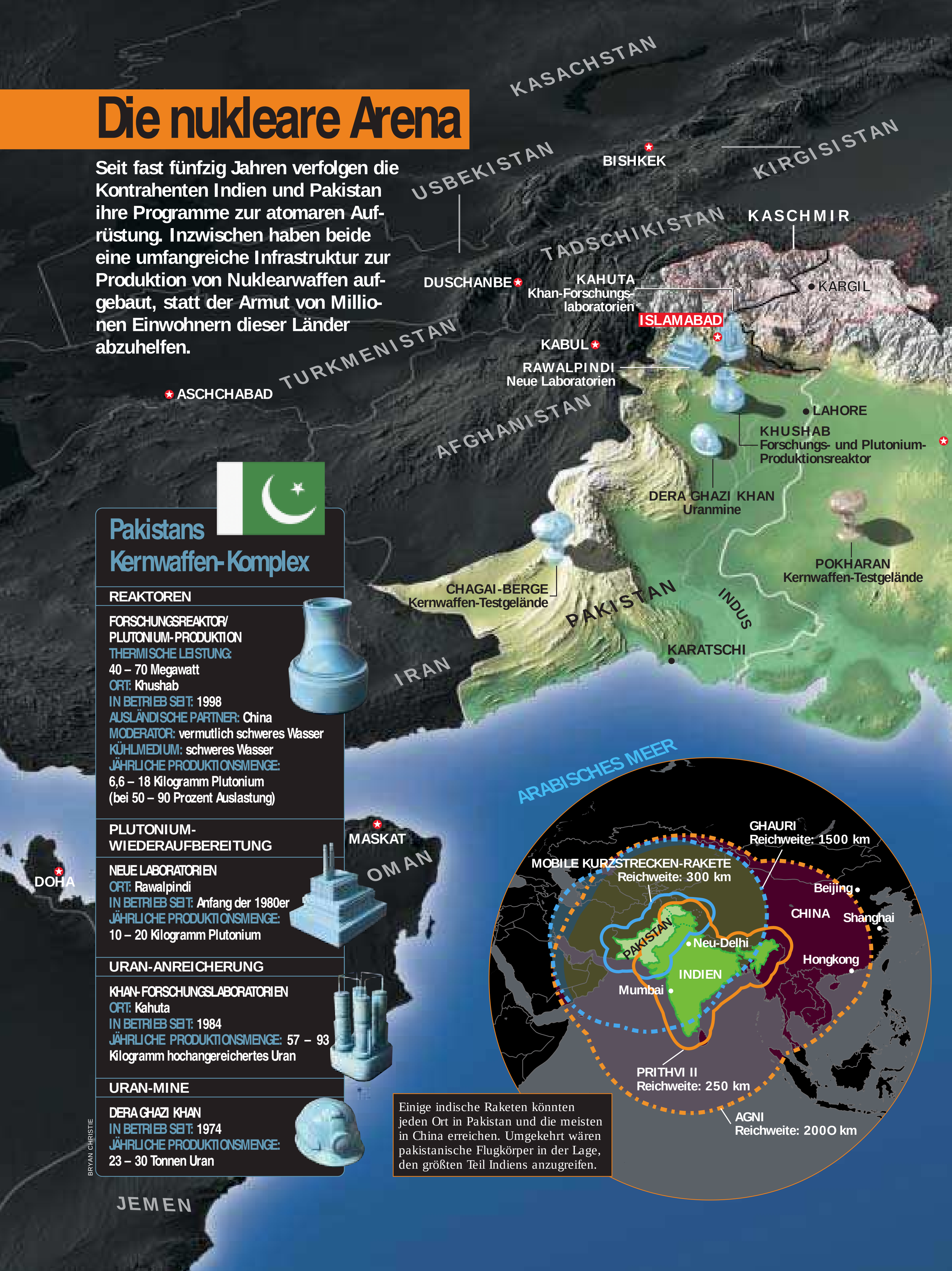
Mit dem Ende des Kalten Krieges nahmen die Spannungen in der Dritten Welt erst recht zu. Die fünf erklärten Nuklearmächte – USA, Russland, Großbritannien, Frankreich und China – einigten sich 1996 auf ein umfassendes Verbot von Testexplosionen, ohne jedoch auf die eigenen Nukleararsenale zu verzichten. Das empfanden die Bomben-Lobbys in Indien und in Pakistan als Zementierung des Nuklearmonopols der Industrienatio-



AAMIR QURESHI AFP PHOTO / CORBIS

Die nukleare Arena

Seit fast fünfzig Jahren verfolgen die Kontrahenten Indien und Pakistan ihre Programme zur atomaren Aufrüstung. Inzwischen haben beide eine umfangreiche Infrastruktur zur Produktion von Nuklearwaffen aufgebaut, statt der Armut von Millionen Einwohnern dieser Länder abzuhelfen.



Pakistans Kernwaffen-Komplex

REAKTOREN

FORSCHUNGSREAKTOR/ PLUTONIUM-PRODUKTION
THERMISCHE LEISTUNG: 40 – 70 Megawatt
ORT: Khushab
IN BETRIEB SEIT: 1998
AUSLÄNDISCHE PARTNER: China
MODERATOR: vermutlich schweres Wasser
KÜHLMEDIUM: schweres Wasser
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 6,6 – 18 Kilogramm Plutonium (bei 50 – 90 Prozent Auslastung)

PLUTONIUM-WIEDERAUFBEREITUNG

NEUE LABORATORIEN
ORT: Rawalpindi
IN BETRIEB SEIT: Anfang der 1980er
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 10 – 20 Kilogramm Plutonium

URAN-ANREICHERUNG

KHAN-FORSCHUNGSLABORATORIEN
ORT: Kahuta
IN BETRIEB SEIT: 1984
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 57 – 93 Kilogramm hochangereichertes Uran

URAN-MINE

DERA GHAZI KHAN
IN BETRIEB SEIT: 1974
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 23 – 30 Tonnen Uran

Einige indische Raketen könnten jeden Ort in Pakistan und die meisten in China erreichen. Umgekehrt wären pakistanische Flugkörper in der Lage, den größten Teil Indiens anzugreifen.

Indiens Kernwaffen-Komplex

REAKTOREN

CIRUS
THERMISCHE LEISTUNG: 40 Megawatt
ORT: Mumbai
IN BETRIEB SEIT: 1960
AUSLÄNDISCHE PARTNER: Kanada
MODERATOR: schweres Wasser
KÜHLMEDIUM: leichtes Wasser
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 6,6 – 10,5 Kilogramm Plutonium (bei 50 – 90 Prozent Auslastung)

DHRUVA
THERMISCHE LEISTUNG: 100 Megawatt
ORT: Mumbai
IN BETRIEB SEIT: 1985
MODERATOR: schweres Wasser
KÜHLMEDIUM: schweres Wasser
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 16 – 26 Kilogramm Plutonium (bei 50 – 90 Prozent Auslastung)

SCHNELLER BRÜTER/TESTREAKTOR
THERMISCHE LEISTUNG: 40 Megawatt
ORT: Kalpakkam
IN BETRIEB SEIT: 1983
AUSLÄNDISCHE PARTNER: Frankreich
KÜHLMEDIUM: flüssiges Natrium
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: 4 – 6,4 Kilogramm Plutonium (bei 50 – 90 Prozent Auslastung)

PLUTONIUM-WIEDERAUFBEREITUNG

TROMBAY
ORT: Mumbai
IN BETRIEB SEIT: 1964
JÄHRLICHE KAPAZITÄT: 30 – 50 Tonnen abgebrannter Brennstoff in metallischer Form

PREFRE
ORT: Tarapur
IN BETRIEB SEIT: 1977
JÄHRLICHE KAPAZITÄT: 100 Tonnen abgebrannter Brennstoff in oxidischer Form

KARP
ORT: Kalpakkam
IN BETRIEB SEIT: 1997
JÄHRLICHE KAPAZITÄT: 100 – 125 Tonnen abgebrannter Brennstoff in oxidischer Form

URAN-ANREICHERUNG




RATTEHALLI
ORT: Mysore
IN BETRIEB SEIT: 1990
JÄHRLICHE PRODUKTIONSMENGE: unbekannt
Angeblich Produktion von Brennstoff für ein Atom U-Boot

URAN-MINE

JADUGODA
IN BETRIEB SEIT: 1968
Jährliche Produktionsmenge: 200 Tonnen Uran

N
0 100 200 300 400 500 600 km
CHINA
BHUTAN
THIMBU
NEPAL
KATMANDU
NEU-DELHI
GANGES
DACCA
KALKUTTA
JADUGODA Uranmine
BANGLA-DESCH
INDIEN
GOLF VON BENGALEN
TARAPUR PREFRE
MUMBAI Dhruva Trombay CIRUS
KALPAKKAM KARP Schneller Brüter-Testreaktor
CHENNAI
MYSORE Rattehalli
INDISCHER OZEAN
SRI LANKA



Gastkommentar

Offene Nukleargeheimnisse?

Durch Pakistans losen Umgang mit Geheiminformationen könnten Terroristen Zugang zu Nuklearinformationen haben

All die Jahre haben mehrere Regierungen Pakistans dem Westen versichert, sie hätten ihre Atomwaffen samt Zubehör und Technologie fest im Griff und im Lande unter strenger Kontrolle. Aber genau davon waren westliche Nuklearanalysten niemals restlos überzeugt. Etliche Mitglieder des pakistanischen Nuklearprogramms sowie des Militärs könnten sehr wohl noch Sympathien für die radikal-islamische Sache pflegen. Besonders Anlass zu Besorgnis lieferten die illegale Hilfe und Sicherheitsverletzungen in der Entwicklung des Programms.

Von Anfang an baute es auf illegale Beschaffungsmaßnahmen und vorsätzliche Täuschung. Kontakte mit halbseidenen Mittelsmännern wurden ebenso gepflegt wie mit Firmen, die westliche Exportrichtlinien in Abhängigkeit vom Preis befolgten, den zu zahlen man bereit war. In einer bestimmten Organisationskultur finden frustrierte Mitarbeiter immer Gründe, geheime Objekte oder vertrauliches Wissen abzugeben.

Indien ist von solchen Problemen weniger betroffen, denn sein Nuklearprogramm ist älter als das Pakistans. Ursprünglich bezog Indien seine nukleare Infrastruktur von westlichen Zulieferern, bis westlichen Regierungen klar wurde, in welchem Maße Entwicklungsländer ihr ziviles Nuklearprogramm missbrauchten, um Atombomben herzustellen. Pakistan ist dabei keineswegs das einzige Land, das mit der Geheimhaltung lax umgeht. So war bekannt, wie schlecht das deutsche Programm einer zivilen Gaszentrifuge unter Verschluss blieb. Ende der 1980er Jahre wurde der Irak geheimerweise von deutschen Nuklearexperten unterstützt.

Eine Schlüsselkomponente, die Herstellung von hoch angereichertem, bombenfähigen Uran, hatte sich Pakistan durch Spionage angeeignet. Mitte der 1970er Jahre arbeitete der Initiator des Programms, A. Q. Khan, in einer holländischen Ingenieurfirma. Dort hatte er die Aufgabe, geheime Entwurfspläne von Gaszentrifugen zu übersetzen. So hatte er Zugang zu einer Vielfalt kritischer Informationen. Nach seiner Rückkehr nach Pakistan, gründete Khan dann die Ingenieur-Forschungs-Laboratorien, heute bekannt als Dr.-Khan-Forschungslaboratorien, um dieses Wissen in eine Bombenfabrik umzumünzen.

Laut einem Memorandum, welches das US-amerikanische State Department 1983 freigegeben hatte, verbarg Pakistan seine Anreicherungsaktivitäten mit falschen Angaben über die Verwendung von Ausrüstungsimporten aus dem Westen. So deklarierte Pakistan

nen. 1998 kamen in Indien Hindu-Nationalisten an die Regierung und ordneten sofort Kernwaffentests an.

In Pakistan riefen islamistische Gruppen zum Heiligen Krieg für Kaschmir und zum forcierten Bau von Atomwaffen auf: Gegen ein nuklear hochgerüstetes Pakistan würde Indien trotz seiner drückenden konventionellen Überlegenheit gewiss stillhalten. Schon drei Wochen nach den indischen Tests führte Pakistan – trotz diplomatischer Bemühungen von USA und China – eigene Versuchsexplosionen durch.

Seit den Nukleartests von 1998 hat sich das Wettrüsten im Süden Asiens enorm beschleunigt. Trotz bitterer Armut in weiten Teilen der Bevölkerung werden Raketen, U-Boote, Überwachungs- und Abwehrsysteme entwickelt. Indien plant, nukleare Waffensysteme auf Flugzeugen und mobilen Abschussrampen zu Lande und zu Wasser zu stationieren; das Ganze würde insgesamt rund 10 Milliarden Euro verschlingen. Pakistan kündigte im Vorjahr an, zumindest eines seiner U-Boote mit Nuklearraketen zu bestücken.

Allein schon das Stationieren nuklearer Waffen auf relativ kleinem Gebiet erhöht die Gefahr eines unabsichtlich aus- ▶



AP PHOTO; KLEINES BILD: TERRY C. WALLACE / UNIVERSITÄT VON ARIZONA

Der unterirdische Test einer indischen Kernwaffe am 11. Mai 1998 brachte das darüber liegende Erdreich zum Einsturz. Den seismischen Daten zufolge lag die Sprengkraft zwischen 15 und 30 Kilotonnen – halb so hoch wie von Indien behauptet (kleines Bild).



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON SPACE IMAGING

Plutonium für mehrere Bomben jährlich produziert der Kernreaktor im pakistanischen Khushab. Nach der Größe der Kühltürme auf dem Satellitenbild schätzen Experten die Reaktorleistung auf 50 Megawatt.


MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON URENCO NEDERLAND

Pakistan verschaffte sich heimlich die Konstruktionspläne für Gaszentrifugen zur Uran-Anreicherung; im Bild eine Anlage der europäischen Urenco-Firmengruppe.

tan seine Gaszentrifugenanlage einmal als Fabrik zur Herstellung synthetischer Butter. In einem Interview vom Jahre 1999 sagte Khan, sein Programm hätte sich Ausrüstungsgegenstände über Offshore-Zwischenfirmen in Japan, Singapur und anderswo beschafft.

Um an Geheiminformationen heranzukommen, verfuhren Khan und seine Kollegen nach einer Art Robin-Hood-Methode. Ende der 1980er Jahre veröffentlichten sie dann in westlichen Zeitschriften einige Artikel über Gaszentrifugen. Damit sollte demonstriert werden, dass Pakistan in der Lage sei, Atombomben zu bauen.

Einer der pakistanischen Artikel stellt die einzige, öffentlich verfügbare Untersuchung von Gebläsen zur Herstellung von extrahartem Spezialstahl dar. Jahrelang betrachtete Urenco, eine britisch-deutsch-holländische Anreicherungsfirma, allein die Erwähnung solcher Gebläse als einen Bruch ihrer Geheimhaltungsregeln.

Wie weit gingen Pakistans Kernphysiker noch bei ihrer Verbreitung der Kunst des Bombenbaus? Die UN-Waffeninspektoren stießen im Irak auf ein einseitiges Geheimdokument mit der Aufschrift TOP SECRET. Es enthielt ein Angebot seitens Pakistans zur Hilfe bei Nuklearwaffen. Laut diesem Dokument sei 1990 eine Zwischenperson an den irakischen Geheimdienst herangetreten. Diese Person bot an, dass A. Q. Khan Bombenentwürfe an den Irak liefern würde.

Den Waffenkontrolleuren gelang es nicht, diese Person aufzuspüren, Pakistan und Khan bestritten jede Beteiligung. Gleichwohl nahmen die Iraker das Angebot ernst – und lehnten es ab, wohl aus Furcht, Khan könnte dabei zu viel über Iraks Nuklearwaffenprogramm erfahren.

Im März 2001 wurde Khan als Leiter des pakistanischen Nuklearprogramms abgelöst. Im Sommer 2001 tauchten Berichte auf, dass Khans Labor seine Beziehungen mit Nordkoreas Programm für ballistische Raketen weiterpflegen würde.

Es gibt keinerlei Beweise für eine Verbindung zwischen der Regierung Pakistans und irgend einer Terroristengruppe. Aber, wie bekannt, unterstützte Pakistan die Taliban in Afghanistan bis zum 11. September.

David Albright

Der Physiker ist Präsident des Institute for Science and International Security in Washington D.C. Er war einer der Waffeninspektoren im Irak.



Indiens Raketen

AGNI („Feuer“) I
Typ: Erste Stufe Festtreibstoff, zweite Stufe Flüssigtreibstoff
Reichweite: 1500 – 2000 Kilometer
Gefechtskopf: 1000 Kilogramm
Status: ausgesetzt

AGNI II
Typ: Zwei Stufen mit Festtreibstoff
Reichweite: 2000 Kilometer
Gefechtskopf: 1000 Kilogramm
Status: im April 1999 getestet

PRITHVI („Erde“) I
Typ: einstufig, Flüssigtreibstoff, basiert auf der russischen SA-2 Boden-Luft-Rakete
Reichweite: 150 Kilometer
Gefechtskopf: 1000 Kilogramm
Status: einsatzbereit

PRITHVI II
Typ: einstufig, Flüssigtreibstoff
Reichweite: 250 Kilometer
Gefechtskopf: 500 Kilogramm
Status: im Januar 1996 getestet

PRITHVI III
Typ: einstufig, Flüssigtreibstoff, seegestützt

SAGARIKA („Meergeboren“, ohne Abbildung)
Typ: Marschflugkörper/ballistische Rakete für U-Boote
Reichweite: vermutlich 300 Kilometer
Gefechtskopf: unbekannt
Status: in der Entwicklung

Pakistans Raketen

HATF („Rüstung“) I
Typ: einstufig, Festtreibstoff, basiert auf einer französischen Höhenforschungsrakete
Reichweite: 60 – 80 Kilometer
Gefechtskopf: 500 Kilogramm
Status: im Januar 1989 getestet

HATF II
Typ: einstufig, Festtreibstoff
Reichweite: 280 – 300 Kilometer
Gefechtskopf: 500 Kilogramm
Status: im Januar 1989 getestet

HATF III
Typ: einstufig, Festtreibstoff
Reichweite: bis 600 Kilometer
Gefechtskopf: 250 Kilogramm
Status: im Januar 1997 getestet

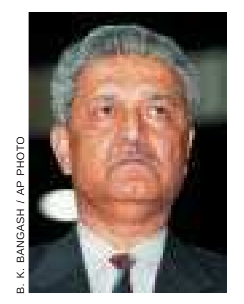
M-11 (ohne Abbildung)
Typ: einstufig, Festtreibstoff
Reichweite: 290 Kilometer
Gefechtskopf: 500 Kilogramm
Status: angeblich aus China importiert

GHAURI (Name eines afghanischen König des 12. Jahrhunderts)
Typ: einstufig, Flüssigtreibstoff; ähnelt einer Rakete Nordkoreas
Reichweite: 1500 Kilometer
Gefechtskopf: 700 Kilogramm
Status: im April 1998 getestet, in Serie seit November 1998

SHAHEEN („Adler“) I
Typ: einstufig, Festtreibstoff
Reichweite: 600 – 750 Kilometer
Gefechtskopf: 1000 Kilogramm
Status: im April 1999 getestet

SHAHEEN II
Typ: zweistufig, Festtreibstoff
Reichweite: 2400 Kilometer
Gefechtskopf: unbekannt
Status: in der Entwicklung

BRYAN CHRISTIE


B. K. BANGASH / AP PHOTO


BHABHA ATOMIC RESEARCH CENTER

Zwei Bombenväter: der Pakistani A. Q. Khan (l.) und der Inder H. J. Bhabha

gelösten Atomkriegs. Angesichts einer Raketenflugdauer von drei bis fünf Minuten zwischen den verfeindeten Staaten sind Frühwarnsysteme nutzlos. Der oben bereits zitierte indische Experte Ramana hat 1998 durchgerechnet, was ein pakistanischer Erstschlag mit einer einzigen Bombe von eher bescheidener Hiroshima-Sprengkraft anrichten würde, wenn sie auf Bombay niederginge: In den ersten Monaten würden 150 000 bis 850 000 Menschen sterben.

Tatsächlich bereitet sich das indische Militär auf solche Eventualitäten vor. Im Mai des Vorjahres führte es unter dem Titel „Operation Vollständiger Sieg“ umfangreiche Manöver an der Grenze zu Pakistan durch, bei denen unter anderem das Verhalten bei einer nuklearen Attacke trainiert werden sollte.

Bereits lange vor dem 11. September war die Region ein nuklear bestücktes Pulverfass. Der Krieg in Afghanistan, der Dauerkonflikt um Kaschmir und der Anschlag auf das indische Parlament vom 13. Dezember haben eine Lunte entfacht, die nur durch eine internationale Friedensanstrengung bis auf den letzten Funken ausgetreten werden kann.

Der indische Rüstungsexperte Ramana und sein pakistanischer Kollege Nayyar betonen übereinstimmend, dass der Westen einsehen muss, wie untauglich seine bisherige Politik der Nichtweitergabe von Nuklearwaffen war: Weder Indien noch Pakistan wurden dadurch an der Herstellung der Bombe gehindert. Beide Forscher sehen einen engen Zusammenhang zwischen Nichtweitergabe und globaler Abrüstung: Solange die Nuklearmächte der Ersten Welt auf ihren Arsenalen beharren, werden die Länder der Dritten Welt versucht sein, ihre Konflikte ebenfalls mit Atomwaffen zu lösen – und sie werden Mittel und Wege finden, sich die erforderliche Technologie zu verschaffen. ■

Literaturhinweise

Pakistan. Von W.-P. Zingel in: Rüstung statt Entwicklung? In: V. Büttner, J. Krause (Hg.), Internationale Politik und Sicherheit, Bd. 45, S. 160, Nomos, Baden-Baden, 1995.

Out of the Nuclear Shadow. Von Smitu Kothari und Zia Mian (Hg.). Zed Books, 2001.

India’s Nuclear Bomb: The Impact of the Global Proliferation. Von George Perkovich. University of California Press, 1999.

The Making of the Indian Atomic Bomb: Science, Secrecy and the Postcolonial State. Von Itty Abraham. Zed Books, 1998.

Fissile Material Production Potential in South Asia. Von A. H. Nagyyar, A. H. Toor und Zia Mian in: Science and Global Security, Bd. 6, Nr. 2, S. 189, 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

Michael Springer *ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.*

ALBERT-MAUCHER-PREIS

Oh, wie kalt macht Panama!

Zum elften Mal vergab die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) den mit 20 000 Mark dotierten Albert-Maucher-Preis, mit dem junge Nachwuchsforscher im Bereich der Geowissenschaften gefördert werden sollen, die mit eigenständigen, DFG-finanzierten Forschungsprojekten hervorragende Ergebnisse erzielen konnten.

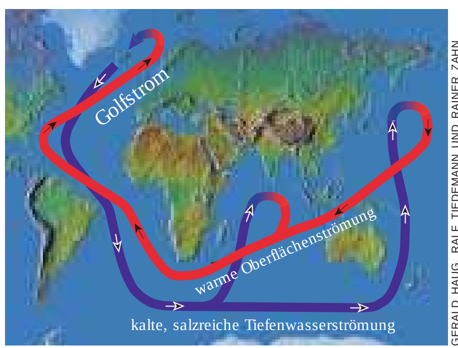
Preisträger für das Jahr 2001 ist der Meeresgeologe Gerald Haug (33). Er forscht seit 1999 an der ETH Zürich im Department Erdwissenschaften. Vorher führten ihn seine Forschungsaufenthalte unter anderem an das Forschungszentrum für marine Geowissenschaften (Geomar) in Kiel und die Ozeanographische Institution in Woods Hole (Massachusetts). Haugs Forschungsschwerpunkt sind die Klimaschwankungen in der erdgeschichtlichen Vergangenheit, insbesondere die vor etwa vier Millionen Jahren einsetzende Klimawende. Dabei kühlte sich die Erde dramatisch ab, und es bildete sich eine permanente Eiskappe auf der Nordhemisphäre. Seitdem pendelt das Weltklima zwischen Eis- und Warmzeiten – bei einem eher niedrigen Temperaturniveau.

Haug konnte zeigen, dass die Schließung der bis dahin offenen mittelamerikanischen Meeresverbindung zwischen Atlantik und Pazifik – der Isthmus von Panama – bei diesem Klimawechsel eine entscheidende Rolle gespielt hat. Erst dadurch bildeten sich die heutigen mächtigen Meeresströmungen (siehe Bild), die das globale Klima entscheidend beeinflussen (vgl. SdW 11/98, S. 32).

Durch die vor 4,6 Millionen Jahren einsetzende Abschnürung der mittelamerikanischen Meeresstraße verstärkte sich der warme Golfstrom. Vor 2,7 Millionen Jahren schloss sich die Landverbindung zwischen Nord- und Südamerika. Bis dahin gelangte immer weniger carbonatreiches und gut durchlüftetes Tiefenwasser aus dem Nordatlantik in das überwiegend carbonatarme und schlecht durchlüftete Zwischenwasser der Karibik. Dies spiegelt sich im Kohlenstoff-Isotopen-Verhältnis von Kalkschalen und im Carbonatgehalt von Sedimenten wieder, die Haug anhand von bis zu 1000 Meter langen Bohrkernen untersucht hat, die im Rahmen des internationalen „Ocean Drilling Program“ mit dem Bohrschiff „Joides Resolution“ gewonnen wurden.



DFG



GERALD HAUG, RALF TIEDEMANN UND RAINER ZAHN

Gerald Haug zeigte, wie die Entstehung der mittelamerikanischen Landenge entscheidend zu den heutigen globalen Meeresströmungen und zum Weltklima beitrug.

Die mit dem Golfstrom verstärkt in den nordatlantischen und arktischen Raum einströmenden tropisch-subtropischen Wassermassen erhöhten dort die Luftfeuchtigkeit und Niederschlagsmenge. Damit war eine Voraussetzung für die Bildung eines nördlichen Eisschilds geschaffen. Die permanente Vereisung setzte jedoch erst ein, als die veränderte Erdschiefe, die einem Zyklus von etwa 41000 Jahre unterliegt, für deutlich kältere Sommer auf der Nordhalbkugel sorgte. Dies konnte Haug ebenfalls anhand von Isotopen-Verhältnissen – diesmal denen des Sauerstoffs – in Muschelschalen und Mikrofossilien von Bohrkernen nachweisen. Gerald Haugs Forschungsinteressen erstrecken sich auch auf die biogeochemischen Kreisläufe des Ozeans und kurzfristigere Klimaschwankungen in den Tropen auf Zeitskalen von Jahren bis Jahrtausenden und deren Auswirkung auf frühe Kulturen.

Der „Maucher-Preis für Geowissenschaften“ ist nach seinem Stifter, dem Münchener Geologen Albert Maucher (1907–1981), benannt.

OTTO-KLUNG-WEBERBANK-PREIS

Elektronik aus Plastik und organische Supraleiter

Der 31-jährige Physiker Jan Hendrik Schön hat den Otto-Klung-Weberbank-Preis 2001 erhalten. Er wird damit für seine richtungsweisenden Arbeiten über organische Halbleiter und zur Supraleitung ausgezeichnet, die er zusammen mit seinen Kollegen Bertram Batlogg und Christian Kloc an den renommierten Bell-Laboratorien in Murray Hill nahe New York durchgeführt hat.

Die drei Physiker haben gemeinsam bereits den Braunschweig-Preis 2001 erhalten, mit dem die Stadt Braunschweig besonders anwendungsorientierte und nachhaltige Forschungen auszeichnet.

Ziel von Schöns Forschungen ist die Entwicklung organischer Materialien für elektronische und optoelektronische Anwendungen. Damit könnten sich Wege zu einer billigen Plastikelektronik eröffnen. Etwa in Form „elektronischer Etiketten“ auf Waren des alltäglichen Bedarfs, mit denen der Gang durch die Supermarktkasse nur noch Sekunden dauern könnte. Hier besitzen organische Materialien einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Silizium-Bauteilen, denn sie sind mit flexiblen Kunststoffschichten kompatibel und lassen sich kostengünstig fertigen.

Zusammen mit Batlogg und Kloc entwickelte Schön einen organischen Feldeffekt-Transistor, dessen elektrische Leitfähigkeit sich von isolierend über metallisch bis hin zu supraleitend variieren lässt. Im Bereich der Supraleitung gelang es dem Trio im vergangenen Jahr, die Sprungtemperatur in Fullerenen (C_{60}) durch den Einbau von Chloroform- oder Bromoform-Molekülen in das C_{60}-Gitter auf den Rekordwert von 117 Kelvin zu erhöhen.

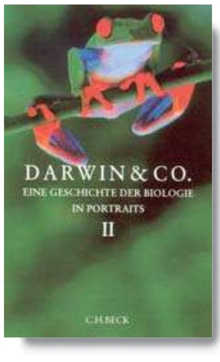


FREIE UNIVERSITÄT BERLIN

Jan Hendrik Schön

Der Otto-Klung-Weberbank-Preis wird im jährlichen Wechsel für Chemie und Physik an herausragende jüngere deutsche Wissenschaftler vergeben. Das Preisgeld beträgt 50000 Mark. Otto Klung (1893–1968), seit Mitte der 1920er Jahre erfolgreicher Unternehmer im Rundfunk- und Kino-Geschäft, vermachte einen Teil seines Vermögens der gleichnamigen Stiftung. Seit 2001 arbeitet diese mit der gemeinnützigen Weberbank GmbH aus Berlin zusammen.





BIOLOGIE

Ilse Jahn und Michael Schmitt (Hg.)

Darwin & Co.

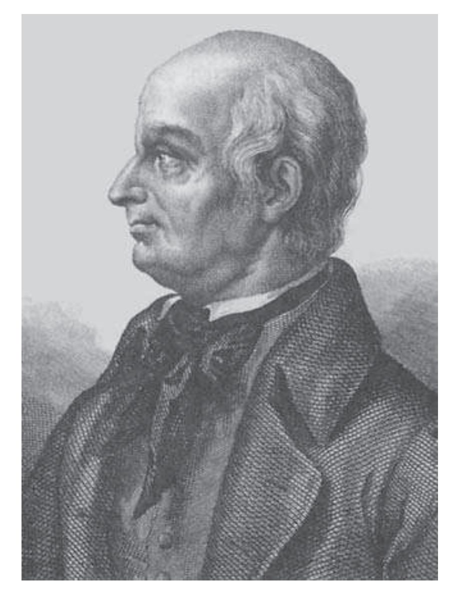
Eine Geschichte der Biologie in Portraits

C. H. Beck, München 2001.
2 Bände, 552 und 574 Seiten, je € 34,90, zusammen € 59,90

Die Herausgeber legen in 52 Porträts bedeutender Biologen und Biologinnen eine an Personen orientierte Geschichte der neuzeitlichen Biologie vor. Dass der Name Charles Darwin für den Titel des Werkes steht, kommt nicht von ungefähr. Darwin (1809–1882) hat das Gesicht der modernen Biologie wie kein anderer geprägt. Aber „die Herausbildung des biologischen Gedankengebäudes hat sehr viel mehr Vorväter als nur Darwin", wie die Herausgeber im Vorwort bemerken, zum Beispiel Carl von Linné (1707–1778), Georges L. L. de Buffon (1707–1788), Charles de Bonnet (1720–1793), Jean Baptiste Lamarck (1744–1829), Richard Owen (1804–1892) und Lorenz Oken (1779–1851). Sie und andere Forscher können als Wegbereiter Darwins gelten und ragen überdies durch eigene Leistungen hervor.



Carl von Linné (1707–1778) schuf das heute noch gültige „Systema naturae".

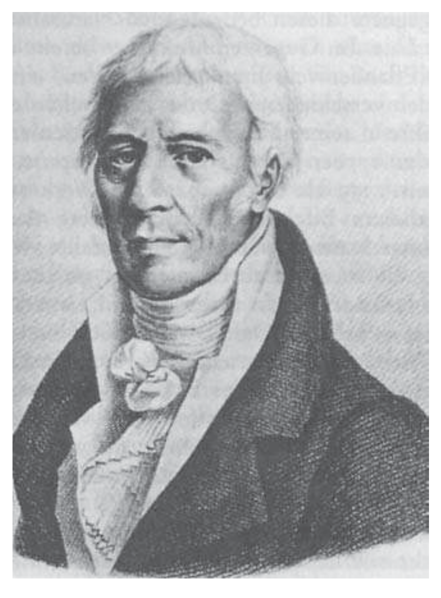


Lazzaro Spallanzani (1729–1799), einer der ersten experimentierenden Biologen

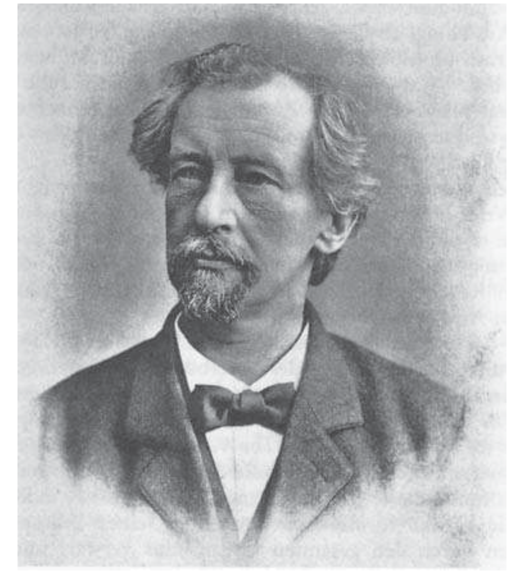
Dass nur zwei Frauen unter den Porträtierten sind, nämlich Elena Aleksandrovna Timoféeff-Ressovsky (1898–1973) und Barbara McClintock (1902–1992), darf nicht zu falschen Schlüssen verleiten. Wissenschaft war eben den größten Teil der Zeit eine Domäne von Männern. Diese historische Trivialität musste naturgemäß auch in diesem Werk ihren Niederschlag finden, dessen Herausgeberin unter Biologiehistorikern freilich internationales Ansehen genießt.

Über die Einzelbiografien hinaus kann man „Darwin & Co." auch einige der Kraftlinien entnehmen, die der Biologie ihren heutigen Status als Leitwissenschaft verschafft haben. Bei der überragenden Bedeutung der Biologie für die Entwicklung unserer Zivilisation ist es interessant zu sehen, welche hervorragenden Leistungen dafür verantwortlich sind.

Ich habe mit diesem Werk viele interessante Stunden verbracht. Es liefert verlässliche Information über Leben und Werk nicht nur bekannter Forscher, sondern widmet sich auch etlichen, die größere Bekanntheit verdient hätten, wie dem Botaniker und Paläontologen Walter Zimmermann (1892–1980) oder dem „Altmeister" der Limnologie, Robert Lauterborn (1869–1952). Dagegen fehlen bedeutende Forscher wie der Zoologe und Naturphilosoph Bernhard Rensch (1900–1990) und der Begründer der modernen theoretischen Biologie, Ludwig von Bertalanffy (1901–1972). Die Herausgeber begründen diesen „Mangel" im Vorwort mit den Grenzen, die ihrem Werk gesetzt wurden. Sie haben auch die antike und mittelalterliche Biologie bewusst ausgelassen, um chronologisch mit der Person Linné und seiner Zeit zu beginnen, welche die Herausbildung der Biologie als eigenständiger Wissenschaft markieren. Noch lebende Personen wurden grundsätzlich nicht berücksichtigt; andernfalls wäre das Fehlen von Ernst Mayr in diesem Werk kaum verzeihlich.



Jean Baptiste Lamarck (1744–1829) begründete die Zoologie der Wirbellosen.

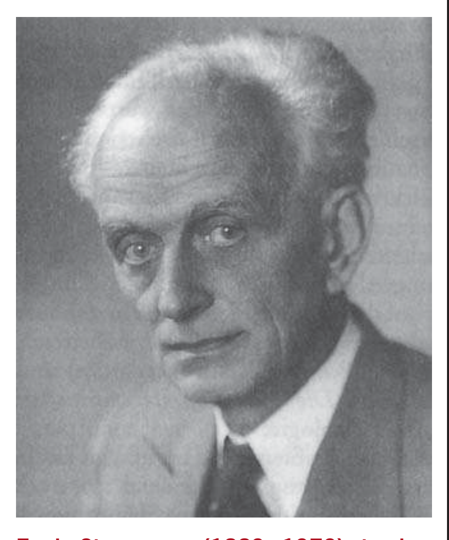


Hugo de Vries (1848–1935) gilt als der Schöpfer der „Mutationstheorie".

Wissenschaft lebt von verschiedenen Temperamenten, und sie wäre viel ärmer, träfen die überkommenen Stereotype vom trockenen, leidenschaftslosen, nur der Wahrheit verpflichteten Forscher zu. „Darwin & Co.“ zeichnet die tragenden Figuren der Biologiegeschichte – fröhli-



Robert Lauterborn (1869–1952) gilt als der „Vater der Limnologie“.



Erwin Stresemann (1889–1972) stand mehr als fünfzig Jahre an der Spitze der deutschen Ornithologie.

che und betrübte, erfolgreiche und enttäuschte – in ihrer ganzen Buntheit. Da hat Erich von Holst (1908–1962), der geniale Begründer der Verhaltensphysiologie, der in Kenntnis seiner relativ geringen Lebenserwartung sehr intensiv lebte, ebenso seinen Platz wie der eigenbrötlerische George G. Simpson (1902–1984), der zu den bedeutendsten Paläontologen und Evolutionsbiologen des 20. Jahrhunderts zählt. Oder die Genetikerin Barbara McClintock, die die „springenden Gene“ beim Mais erforschte und so die Ge- ▶

5×5 Test® Sachbuch
Top Ten Februar 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 21. November 2001 bis 1. Februar 2002).

1. **Christian Moullec**
   Mit den wilden Gänsen fliegen
   Franckh-Kosmos, 121 Seiten, € 30,62
   

2. **Joachim Bublath**
   Chaos im Universum
   Droemer Knaur, 231 Seiten, € 25,89
   23

3. **Friedrich Naumann**
   Vom Abakus zum Internet
   Die Geschichte der Informatik
   Primus, 287 Seiten, € 30,16
   23

4. **David Burnie**
   Tiere.
   Die große Bildenzyklopädie mit über 2000 Arten
   Dorling Kindersley, 624 Seiten, € 50,11
   23

5. **J. P. McEvoy**
   Sonnenfinsternis
   Berlin-Verlag, 255 Seiten, € 19,43
   23

6. **Robin Marantz Hening**
   Der Mönch im Garten
   Die Geschichte des Gregor Mendel und die Entdeckung der Genetik
   Argon, 374 Seiten, € 20,41
   21

7. **Duncan Steel**
   Zielscheibe Erde
   Franckh-Kosmos, 160 Seiten, € 20,41
   20

8. **I. Wilmut, K. Campbell, C. Tudge**
   Dolly
   Hanser, 384 Seiten, € 25,46
   20

9. **Norbert Borrmann**
   Frankenstein und die Zukunft des künstlichen Menschen
   Diederichs, 368 Seiten, € 20,50
   20

10. **Marc D. Hauser**
    Wilde Intelligenz
    C. H. Beck, 378 Seiten, € 24,54
    

netik revolutionierte, allerdings erst spät Anerkennung für ihre Arbeit fand.

Beide Bände werden durch ein umfangreiches Quellen- und Literaturverzeichnis ergänzt. Dabei werden Originalwerke der vorgestellten Forscher und Forscherinnen ebenso angeführt wie Sekundärliteratur (zum Beispiel Biografien). Dieser Anhang eignet sich bestens als Führer zu weitergehenden Studien.

Überhaupt kann dieses Werk als sehr gute Einführung in das Studium der Biologiegeschichte empfohlen werden – und darüber hinaus: Zwischen den Zeilen bietet es viele Hinweise auf die sehr vertrackten und komplizierten Wege der biologischen Erkenntnis und kann auch von ganz allgemein an Wissenschaftsgeschichte Interessierten Gewinn bringend durchgeblättert, besser noch: intensiv gelesen werden.

Die Aufmachung ist ansprechend – Bilder der vorgestellten Forscher (Forscherinnen) tragen dazu bei –, der Preis ist dem Umfang und der Qualität des Werkes angemessen. Wichtiger noch: Man lernt Biologiegeschichte als ein sehr lebendiges Fach zu verstehen.

Franz M. Wuketits

Der Rezensent ist Professor für Wissenschaftstheorie an der Universität Wien.

MEDIZIN

Laurie Garrett

Das Ende der Gesundheit
Bericht über die medizinische Lage der Welt

Aus dem Englischen von Thorsten Schmidt und anderen.
Siedler, Berlin 2001. 541 Seiten, € 24,54



Nach einer fast zwanzigjährigen Pause brach 1995 in der Kleinstadt Kikwit Ebola aus und verbreitete Furcht und Schrecken. Noch immer war wenig über die Viruskrankheit bekannt, und von der Regierung kamen nur spärliche und widersprüchliche Informationen. Die Menschen sahen stattdessen, dass sich die Seuche rasend schnell verbreitete und wie ihre Opfer jämmerlich verbluteten.

Die amerikanische Biologin, Bakteriologin und Immunologin Laurie Garrett weiß die Situation in Zaire in aufrüttelnden Bildern zu zeichnen und den Leser mit der Schilderung von Einzelschicksalen zu fesseln. Nach Afrika nimmt sie ihn weiter mit auf eine schreckensreiche Reise nach Indien, Osteuropa und in ihr Heimatland. Zwischen Reportage, Interview, Zeitungsmeldungen und Bericht wechselnd, beleuchtet sie das globale Gesundheitswesen. Geschickt verflicht die mehrfach preisgekrönte Wissenschaftsjournalistin Garrett dabei trockene Statistiken mit eigenen Erlebnissen. Zahlreiche Quellenangaben in dem Buch zeugen von umfangreicher Recherchearbeit, auch wenn sich die Zahlen manchmal widersprechen.

So erfährt der Leser, dass sich das tödliche hämorrhagische Fieber in Zaire so rasch ausbreiten konnte, weil die wesentlichen Elemente eines öffentlichen Gesundheitssystems fehlten. Das Wohl der Bevölkerung galt nicht viel in dem Land, in dem der korrupte Diktator Mobutu Sese Seko die Staatskassen plünderte. So bestand in den Dörfern die einzige Versorgung der Kranken in der Pflege durch Verwandte und Freunde. Das Virus rottete hier oft ganze Familien aus. In den Städten fand es zusätzlich einen idealen Nährboden in den Kliniken, wo Pfleger und Ärzte wegen der katastrophalen Hygienebedingungen unbewusst zu seiner Verbreitung beitrugen.

Auch zur Situation in Indien, wo 1995 die als ausgestorben geltende Pest zurückkehrte und Hunderte von Toten forderte, liefert Garrett Hintergrundinformationen: Obwohl das Wirtschaftswachstum in Indien Rekorde brach, wurden die Ausgaben für das öffentliche Gesundheitswesen gekürzt. Der Staat übertrug die Verantwortung auf die Bundesländer, die jedoch weder finanzielle Mittel noch ein besonderes Interesse daran hatten und die Krankheitsfälle vielfach ignorierten. Garrett beschreibt das Verhalten einzelner Ärzte ebenso wie das diagnostische Durcheinander bei den staatlichen Institutionen, deren Glaubwürdigkeit daraufhin endgültig gegen Null ging. Die Medien schließlich erzeugten zusätzliche Ängste mit einer Mischung aus Beruhigungsfloskeln und Panikmache. Misstrauen („Betrayal of Trust“ ist der Originaltitel), Aberglaube und Angst – auf diesem Grund wächst Panik.

Aberglaube und Angst …

In den Ostblockländern litt das öffentliche Gesundheitswesen nicht nur an der allgemein verbreiteten Korruption, sondern auch an der intellektuellen Lähmung der Naturwissenschaftler. Durch das herrschende politische und wirtschaftliche Chaos kam es in Russland in den neunziger Jahren zu einem exponentiellen Anstieg der Immunschwäche Aids. Oft fehlte das Geld, um Krankheiten wirksam zu bekämpfen, sodass eine ganze Reihe von Epidemien ausbrach, mit einer erschreckend hohen Zahl an erkrankten Kindern.

… lassen Panik gedeihen

Selbst für das hoch entwickelte Amerika malt Garrett ein düsteres Bild. In den Vereinigten Staaten ist zwar die Anzahl an Aids-Toten und Syphiliserkrankungen gesunken, aber die Zahl an Neuinfektionen bleibt hoch. Ärzte setzen oft rein routinemäßig Antibiotika ein, wodurch immer häufiger Resistenzen auftreten. Die Bedrohung durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Bluthochdruck oder Fettleibigkeit nimmt stark zu. „Es brauchte Jahrhunderte, um in Nordamerika ein wirksames öffentliches Gesundheitswesen aufzubauen, und weniger als zwei Jahrzehnte, es zu ruinieren“, resümiert die Autorin.

Meiner Ansicht nach malt die Autorin zu viele Horrorbilder, doch gelingt es ihr, damit den Leser aufzurütteln. Ihre Darstellung zeigt, wie sehr die politischen und gesellschaftlichen Verhältnisse und das öffentliche Gesundheitswesen sich gegenseitig beeinflussen. Noch immer leidet ein Großteil der Weltbevölkerung unter grundlegenden Entbehrungen, sind Ziele und Aufgaben des Gesundheitswesens unklar und steht ein oberflächliches Verständnis von Kostenwirksamkeit im Vordergrund. Garrett bleibt indes nicht bei der Zustandsbeschreibung stehen, sondern schlägt konkrete Abhilfen vor.

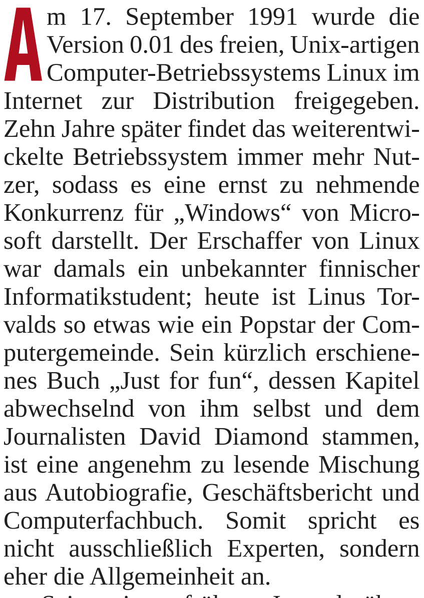
Wie sie in einer recht langen Einleitung und einem Epilog beschreibt, veranlasste sie das große Echo auf ihren Bestseller „The Coming Plague“ („Die kommenden Plagen“, siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 120) zu der Reise, aus der das vorliegende Buch hervorgegangen ist. Es ist Laurie Garrett auf jeden Fall damit gelungen, persönliche Betroffenheit und professionellen Journalismus in eindrucksvoller Art zu verbinden.

Bettina Pabel

Die Rezensentin ist promovierte Lebensmittelchemikerin und Journalistin in Hannover.

INFORMATIK





Linus Torvalds und David Diamond

Just for fun

Wie ein Freak die Computerwelt revolutionierte

Aus dem Englischen von Doris Märtin.
Hanser, München 2001. 275 Seiten, € 19,90

Am 17. September 1991 wurde die Version 0.01 des freien, Unix-artigen Computer-Betriebssystems Linux im Internet zur Distribution freigegeben. Zehn Jahre später findet das weiterentwickelte Betriebssystem immer mehr Nutzer, sodass es eine ernst zu nehmende Konkurrenz für „Windows“ von Microsoft darstellt. Der Erschaffer von Linux war damals ein unbekannter finnischer Informatikstudent; heute ist Linus Torvalds so etwas wie ein Popstar der Computergemeinde. Sein kürzlich erschienenes Buch „Just for fun“, dessen Kapitel abwechselnd von ihm selbst und dem Journalisten David Diamond stammen, ist eine angenehm zu lesende Mischung aus Autobiografie, Geschäftsbericht und Computerfachbuch. Somit spricht es nicht ausschließlich Experten, sondern eher die Allgemeinheit an.

Seit seiner frühen Jugend übten Computer auf Torvalds eine geradezu magische Faszination aus – das geht schnell aus den ehrfürchtigen Schilderungen über die erste Bekanntschaft mit einem Computer hervor. Die machte der kleine Linus auf dem Schoß seines Großvaters mit einem VIC-20-Computer, der noch mit Lochkarten programmiert wurde. Diese Lochkarten wurden zu seiner Lieblingsbeschäftigung.

Etwas ebenso Schlichtes wie Umwerfendes hatte es ihm angetan: Der Computer führt genau das aus, was man ihm befiehlt; außer den technischen Grenzen kennt er nur diejenigen der Programmierkunst. So kaufte sich Linus im Alter von 16 Jahren für 2000 Dollar einen Sinclair QL und verwirklichte zahlreiche Programmierprojekte damit. Mängel am Betriebssystem, dem zentralen Programm eines Computers, weckten sein Interesse. Linus entdeckte das einschlägige Buch des Informatikprofessors Andrew Tanenbaum als „seine Bibel“; an der Universität hörte er Vorlesungen über die Programmiersprache C sowie die Betriebssysteme Unix und Minix. Angetrieben von den Unzulänglichkeiten und hohen Kosten verschiedener Betriebssysteme und dem Interesse an den Fähigkeiten des damals neuen 386er Prozessors, beschloss er, ein eigenes, freies Betriebssystem zu schreiben.

„Frei“ bedeutet nicht nur kostenlos, sondern auch, dass die Quellen, also der eigentliche Betriebssystemcode, frei einzusehen sind. Änderungen und Verbesserungen an diesem Code dürfen jedoch nicht gewerblich verkauft werden, sondern sollten öffentlich zugänglich gemacht werden. Darauf basiert die Open-Source-Philosophie für Software. Neben den technischen Aspekten widmet das Buch auch diesem ehrenhaften Konzept viel Raum. Einer großen Entwicklergemeinde für freie Software ist es zu verdanken, dass Linux heute so viele Möglichkeiten bietet und deswegen immer erfolgreicher Marktanteile gewinnt.

Der Buchtitel fasst die Lebensphilosophie des Autors treffend zusammen

Seine Ausführungen zum heutigen Urheberrecht und dem umstrittenen Digital Millenium Copyright Act (DMCA), den er kritisch hinterleuchtet, sind ebenfalls sehr einsichtig und logisch. Schließlich kommt auch noch im Bezug auf die Open-Source-Philosophie das Geld ins Spiel. Linus findet einen überzeugenden Mittelweg zwischen dem Fundamentalismus einiger Angehöriger der Open-Source-Gemeinde wie Richard Stallman, der den Verkauf von Software am liebsten als Straftat sähe, und dem reinen Ziel des Geldverdienens wie bei Microsoft. Nicht zuletzt will er sich dafür rechtfertigen, dass er im Dienste des Konzerns Transmeta jetzt mit „abgeschlossener“ Software sein Geld verdient.

Trotzdem gelingt es, jeglichen Eindruck von Selbstbeweihräucherung und Selbstgerechtigkeit zu vermeiden. Auf unterhaltsame Art und Weise erzählt Torvalds sein Leben: die Existenz als computersüchtiger Jugendlicher („Geek“), die Begegnung mit seiner späteren Frau Tove, seine Rolle als Familienvater von drei Kindern sowie seine jetzige Arbeit. Im Schlusskapitel zeichnet Torvalds die Grundzüge seiner Lebensphilosophie nach, die ihre beste Zusammenfassung wohl im Buchtitel selbst findet.

Das Buch bietet eine äußerst ansprechende Mischung aus Technik und Computern samt der dahinter stehenden Phi-



MATHEMATIK

Morton D. Davis

The Math of Money

Making Mathematical Sense of Your Personal Finances

Springer, New York 2001. 206 Seiten, $ 25,–

Nein, es geht nicht um konkrete Anlageempfehlungen. Der emeritierte New Yorker Mathematikprofessor Morton Davis beschreibt eine abstrakte Welt, die zwar so unangenehme Dinge enthält wie Inflation, Zinsen und Totalverlust von Aktien, aber nicht so lästige Kleinigkeiten wie Steuern und Bankprovisionen, die das Bild nur komplizierter machen.

Genau das aber macht das Buch auch für den Leser außerhalb des amerikanischen Bank- und Steuersystems hilfreich. Morton bringt, unter sehr mäßigem Gebrauch von Formeln, allgemeine, gleichwohl gelegentlich überraschende Wahrheiten über Spekulation, den Wert von Rentenpapieren, Verzinsung – aus der Perspektive des Geldanlegers wie des Kreditnehmers –, die Rettung des Ersparten vor der Inflation und zum Schluss ein wenig Spieltheorie.

Ein Rezept zum sicheren Reichwerden steht nicht in dem Buch, aber die Widerlegung solcher Rezepte sehr wohl. So zerpflückt Davis sorgfältig die angeblich todsicheren Systeme, in der Spielbank stets zu gewinnen. Und wer sich über die Rückzahlung einer langfristigen Hypothek Gedanken macht, kann jedenfalls nützliche grundsätzliche Überlegungen aus dem Buch ziehen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

losophie und Politik einerseits sowie zahlreichen Geschichten und Anekdoten andererseits. Das Ganze ist in einen lockeren und amüsanten Stil verpackt, die Übersetzung nicht zu bemängeln. Insgesamt ergibt sich ein Teil digitaler Zeitgeschichte, der jeden etwas angeht. Dieses Buch ist beileibe nicht für Computerfreaks maßgeschneidert (obwohl der Autor für die Seiten 45 – 128 eine Warnung vor „mittelschwerer Geek-Sprache“ ausspricht), sondern für den interessierten Laien. Dieser erfährt auf den 275 Seiten nicht nur vieles über die Welt des Programmierens, sondern auch über den kommunistischen Vater des Autors und seine Bekanntschaft mit vielen Größen des Silicon Valley.

Zum Nachschlagen ist ein guter Index vorhanden, aber ein Literaturverzeichnis fehlt – ein Schwachpunkt, denn für den einen oder anderen könnte die Lektüre „nur zum Spaß“ Anlass genug sein, sich in die Materie zu vertiefen.

Markus Mathys

Der Rezensent studiert interdisziplinäre Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Carsten Könneker

„Auflösung der Natur Auflösung der Geschichte“

Moderner Roman und NS-„Weltanschauung“ im Zeichen der theoretischen Physik

Metzler, Stuttgart 2001. 462 Seiten, € 34,–

Spätestens seit breite Debatten über Nano- und Biotechnik, Stammzellenforschung und Embryonenschutz in den zuvor nur musischen Themen vorbehaltenen Feuilletons der Tagespresse stattfinden, wird kaum noch jemand bestreiten, dass naturwissenschaftliche Erkenntnisse auf ziemlich direktem Wege in das Denken der Literaten wie der Politiker eingehen. Dennoch ist eine kulturwissenschaftliche Studie wie die vorliegende, mit welcher der studierte Physiker Carsten Könneker in Germanistik promoviert hat, noch immer eine Rarität.

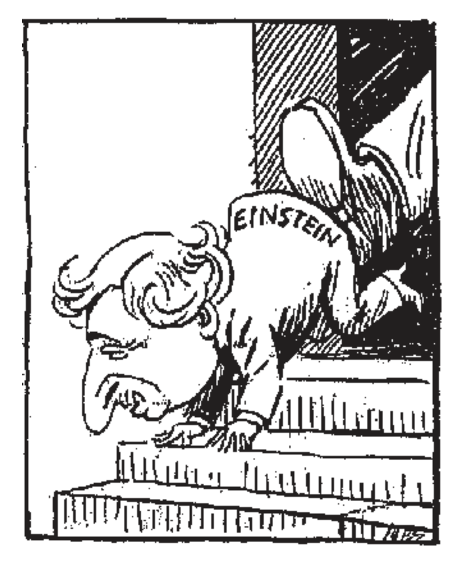


„Das ist die Ablenkung des Lichts … Herr Einstein wird dieses Werk sehr gut verstehen.“ *Le Journal*, 19. März 1922

Könneker weist nicht nur nach, dass wichtige deutschsprachige Romane der zwanziger Jahre von der zeitgenössischen „Revolution der Physik“, also durch Relativitäts- und Quantentheorie, geprägt wurden; er zeigt auch an einer überwältigenden Vielfalt von Indizien, dass die tiefe Verunsicherung, die der Umsturz des klassischen Weltbilds der Physik ▶

im allgemeinen Bewusstsein auslöste, in Deutschland die Ausbreitung der Nazi-Ideologie erleichterte. Eine wichtige Rolle spielte dabei die populäre Person Albert Einsteins, dessen Theorie erst zu der Behauptung „Alles ist relativ“ verballhornt und dann mit dem antisemitischen Klischee vom berechnend-zersetzenden „jüdischen Geist“ belegt wurde.

Denn nicht erst dann, wenn technische Anwendungen in den Alltag eindringen, wird Naturwissenschaft Teil der Kultur: „Wie gezeigt werden konnte“, schreibt Könneneker, „gingen im Gegenteil gerade von der Rezeption der physikalischen *Theorien* ganz entscheidende Impulse auf die Literatur, namentlich den Roman der Moderne aus.“ Die überraschende Unanschaulichkeit der modernen Naturwissenschaft hat Literaten, bildende Künstler und Musiker zu völlig neuartigen Formexperimenten inspiriert – und, wie Könneneker zeigt, in Deutschland zwischen Weimar und „Drittem Reich“ zu antimodernistischen Bewegungen mit letztlich entsetzlichen Folgen geführt. „Auflösung der Natur Auflösung der Geschichte“ warf Gottfried Benn dem Weltbild der neuen Physik vor, als der Dichter in den dreißiger Jahren kurz, aber heftig mit den Nazis flirtete.



„Der Hausknecht der Deutschen Gesandtschaft in Brüssel wurde beauftragt, einen dort herumlungernden Asiaten von der Vorstellung, er sei ein Preuße, zu heilen.“ Deutsche Tageszeitung, 1. April 1933

In einigen seiner zahlreichen Einzeluntersuchungen scheint mir Könneneker übers Ziel hinauszuschießen. Wollte Robert Musil (1880–1942) in seinem Epochenroman „Mann ohne Eigenschaften“ wirklich die Kopenhagener Deutung der Quantenphysik literarisieren – der „andere Zustand“ als Quantenzustand, „Möglichkeitssinn“ und „essayistisches Leben“ als Quantenwahrscheinlichkeit – oder nicht eher die allgemeine Methodik der exakten Naturwissenschaften? Hatte Bertolt Brecht in seinem Drama „Galilei“ mit der Hauptfigur wirklich Einstein im Sinn?

Dem Wert der Studie und ihrer umfassenden Perspektive tun solche Details freilich keinen Abbruch. Dass Könnenekers Arbeit zum Modell weiterer Studien über die Wechselwirkung der ominösen „zwei Kulturen“ wird, ist dringend zu wünschen.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

PREISRÄTSEL

Zickzack



von Pierre Tougne



Zerschneiden Sie die Figur, die ursprünglich von Martin Gardner stammt, in zwei kongruente Teile.

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Jahrbücher 2002 „Ahnerts Astron“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. Februar 2002, eingehen.

Lösung zu „Zahlensalat“ (Dezember 2001)

In einer Menge M von 80 natürlichen Zahlen, die kleiner als 230 sind, haben mindestens zwei Elemente die Differenz 3, 4 oder 7.

Zum Beweis addierte Jan Hendrik Schäfer aus Rodenbach zu jeder Zahl n aus M die Zahl 7; diese Zahlen bilden die Menge M_7. Entsprechend gewann er durch Addition von 4 zu jedem n aus M die Menge M_4. Nehmen wir an, die Behauptung sei falsch. Dann haben M, M_7 und M_4 keine gemeinsamen Elemente. Hätten nämlich M und M_7 ein Element gemeinsam, so hätten die zugehörigen Elemente von M die Differenz 7; entsprechend wäre die Differenz 4 für M und M_4, 3 für M_4 und M_7. Jede dieser drei Mengen hat jedoch 80 Elemente. Also hätten wir insgesamt 240 verschiedene natürliche Zahlen, die sämtlich kleiner sind als $230+7=237$. Das kann nicht sein!

Zahlreichen Einsendern gelang eine Verschärfung: Auch unter 70 Zahlen zwischen 1 und 229 tritt mindestens einmal die Differenz 3, 4 oder 7 auf.

Wenn das nämlich nicht der Fall sein soll, dürfen, wenn die Zahl n in der Schüssel liegt,

➤ $n+3$, $n+4$ und $n+7$ gar nicht,
➤ von den Zahlen $n+1$, $n+5$ und $n+8$ höchstens eine und
➤ von den Zahlen $n+2$, $n+6$ und $n+9$ ebenfalls höchstens eine darin liegen.

Also dürfen von den Zahlen 1 bis 10 höchstens drei in der Schüssel liegen, desgleichen für jede weitere Zehnergruppe. Mit $3\times23=69$ Zahlen sind alle Möglichkeiten von 1 bis 230 ausgeschöpft; spätestens die siebzigste Zahl liefert die geforderte Eigenschaft.

Die Gewinner der zehn schwebenden Kugelschreiber „Pen Ultimate“ sind Christian Hüttel, Braunschweig; Katja Zeug, Würzburg; Jan Hendrik Schäfer, Rodenbach; Wolfgang Bohm-Autzen, Berlin; Hans Linke, Lampertheim; Hans Egli, Zürich; Michèl Fuchs, Leipzig; Marc René Preuß, Rodgau; L. Danzer, Dortmund; und Brigitte Dähne, Freudenberg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Forschen Sie mit!

Das Reich der natürlichen Zahlen ist noch grenzenloser als der Weltraum. Gleichwohl sind dort die Aussichten auf Ruhm für Otto Normal-PC-Besitzer deutlich besser als bei der Suche nach außerirdischen Intelligenzen (SETI@home, Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 109). Am 4. Dezember 2001 traf das Glück den zwanzigjährigen kanadischen Studenten Michael Cameron: Sein PC hatte nach 45 Tagen Teilzeitarbeit entdeckt, dass $2^{13466917}-1$ eine Primzahl ist, und damit die bislang größte bekannte Primzahl gefunden.

Sie wollen die Zahl ausgeschrieben vor sich sehen? Kein Problem: Unter http://www.mersenne.org/prime5.txt ist sie mit ihren reichlich 4 Millionen Dezimalstellen in voller Länge zu finden.

Primzahlen der Form 2^p-1 heißen Mersenne'sche Primzahlen nach dem französischen Mönch Marin Mersenne (1588–1648), der erste fundierte Vermutungen über sie anstellte. Ob sie wirklich prim sind, das heißt keinen anderen Teiler haben als 1 und sich selbst, ist für Zahlen dieser Form weitaus einfacher zu überprüfen als für irgendwelche Zahlen derselben Größe.

„Einfach" ist relativ: Für jede Zahl, die eine Mersenne'sche Primzahl sein könnte, ist trotz der besten Algorithmen eine ungeheure Probierarbeit zu leisten. Um diese auf viele Computer zu verteilen, wurde 1996 das Projekt GIMPS (*Great Internet Mersenne Prime Search*, www.mersenne.org) ins Leben gerufen. Sein Schöpfer ist George Woltman, der über seine Person auf der Projekt-Website nichts verrät.

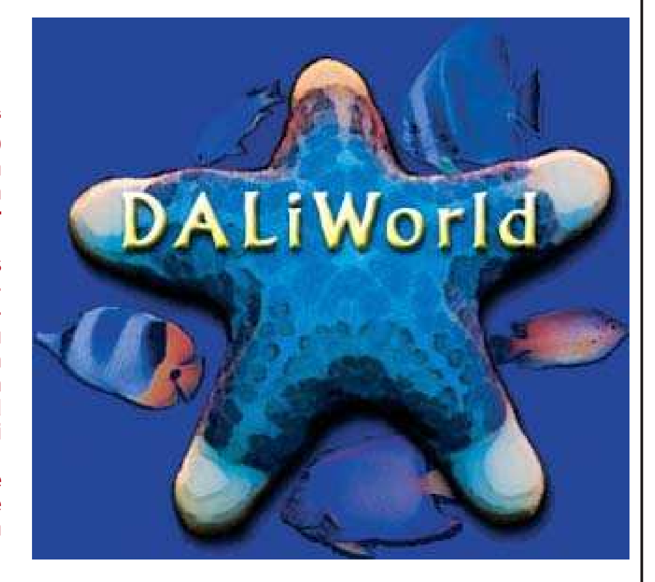
Das Prinzip ist wie bei SETI@home: Jeder ist eingeladen, seinen Computer ein Stück (Forschungs-)Arbeit machen zu lassen, wenn der nichts anderes zu tun hat. Das zugehörige Programm sowie die Einzelaufträge kommen von der Website des Organisators. Projekte dieser Art gibt es zu Dutzenden; www. rechenkraft.de gibt einen gut aufbereiteten Überblick. Eine noch größere Liste ist http://www.evolutionary-research.net/Archive/Links/GlobComp/index.html. Sie führt auch Firmen auf, die für die Nutzung des heimischen PCs zu zahlen versprechen.

Neben zahlreichen mathematischen Durchsuchungsaufgaben (darunter auch zum berühmten Collatz-Problem, Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 112) findet sich unter anderem ein handfestes Simulationsproblem zur Evolutionstheorie (www.evolutionary-research.de). Die Firma United Devices lädt ein, in einem Projekt der Universität Oxford an neuen Krebsmedikamenten mitzuforschen (http://members.ud.com/projects/cancer). Die populären Versuche, mit geballter Computerkraft (Übungs-)Geheimtexte zu entschlüsseln, laufen neben anderen Projekten bei www.distributed.net.

Eine gute Nachricht zum Schluss: Die Zeiten der Traueranzeige (Spektrum der Wissenschaft 6/2001, S. 110) sind vorbei. Nach über einjähriger Zwangspause öffnet sich Eric Weissteins mathematische Schatzkiste (http://mathworld.wolfram.com) in neuer Pracht.

Christoph Pöppe

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Die „DaliWorld" (www.daliworld.net) besteht aus einem virtuellen Ozean, von dem jeder Teilnehmer einen Ausschnitt sieht. Fische, realisiert als Agentensoftware-Programme, schwimmen von Computer zu Computer, können lernen und sich entwickeln und entscheiden, wie bei Agenten üblich, autonom, wohin sie sich bewegen, wen sie fressen und mit wem sie sich paaren wollen.



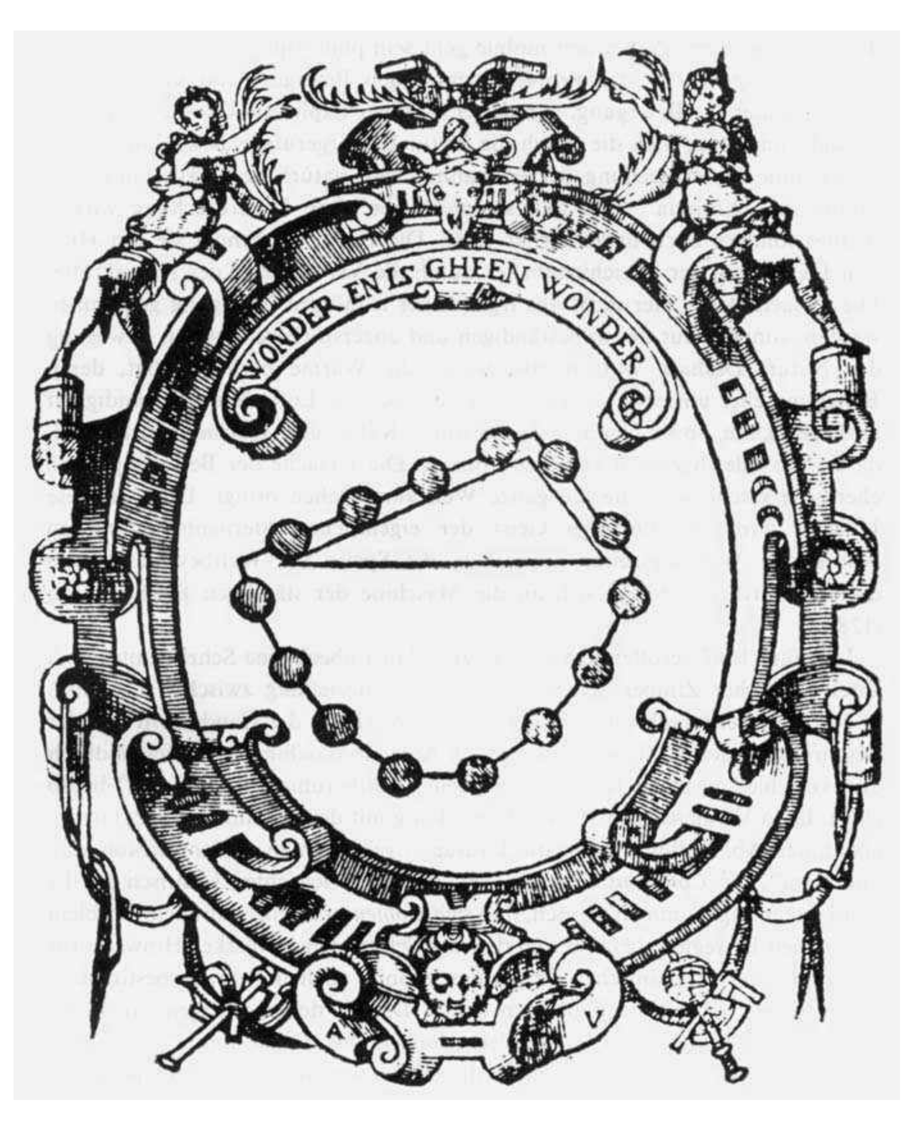
Perpetuum mobile

Es gibt ihn nicht, den unerschöpflichen Kraftquell. Aber der Traum davon hat die erfindungsreichsten Geister beflügelt.

VON WOLFGANG BÜRGER

GRAFIK: AXEL WEIGEND

Nichts ist umsonst. Niemand hat je ein echtes *perpetuum mobile* arbeiten sehen – einen selbsttätigen Mechanismus, der unaufhörlich mechanische Energie aus dem Nichts erzeugt. Sollten Sie den Erfinder eines solchen Gerätes besuchen, können Sie sicher sein, dass er Ihnen seine Maschine nicht vorführt: Entweder ist sie angeblich noch nicht fertig, oder sie befindet sich gerade im Umbau.



„Zwei Gewichte auf zwei schrägen Seiten eines Dreiecks sind dann im Gleichgewicht, wenn sie sich so verhalten wie die Seitenlängen." Die zugehörige Abbildung ziert das Titelblatt von Simon Stevins „Beghinselen der Weeghconst".

Noch bevor die Wissenschaftler einen klaren Begriff von der Energie hatten, wussten einige von ihnen bereits, dass sie nicht beliebig vermehrbar ist. Gottfried Wilhelm Leibniz führte 1686 die kinetische Energie unter dem Namen *vis viva* („lebendige Kraft") in die Theorie ein; die französischen Physiker Jean Victor Poncelet (1788–1867) und Gustave Gaspard Coriolis (1792–1843) definierten um 1826 erstmals die mechanische Arbeit als Produkt von Kraft und Weg. Aber schon im 16. Jahrhundert formierten sich die Fraktionen der Befürworter, die *perpetua mobilia* für möglich und erstrebenswert hielten, und der Kritiker, die sie für unmöglich, sogar für absurd, erklärten. Namentlich der niederländische Mathematiker und Physiker Simon Stevin (1548–1620) postulierte schon 1586 die „Unmöglichkeit einer Krafterschaffung" und erklärte damit, warum eine Kugelkette, die auf zwei glatten schiefen Ebenen unterschiedlicher Neigung lagert (Bild links), sich im statischen Gleichgewicht befinden muss. Wären nämlich die beiden oberen Teile der Kette nicht im Gleichgewicht, müsste sich der gesamte Ring links oder rechts herum in Bewegung setzen, so lange, bis jede Kugel den Platz ihrer Vorgängerin eingenommen hat, und dann aber in alle Ewigkeit, weil ja der Ausgangszustand wiederhergestellt und damit derselbe Gedankengang abermals gültig wäre. Also hätte man ein Perpetuum mobile, das es aber nach dem Postulat nicht geben kann. Da der untere Kettenbogen wegen seiner Symmetrie für sich allein im mechanischen Gleichgewicht ist, kann man ihn weglassen, ohne das Gleichgewicht des Restes der Kette zu stören.

Exakt gilt diese Argumentation nur für „unendlich viele unendlich kleine Kugeln", sprich eine homogene Massenverteilung entlang der Kette. Aber diese infinitesimalen Begriffe standen Stevin noch nicht zur Verfügung. Lässt man den unteren Kettenbogen tatsächlich weg, so ist das Gleichgewicht der Restkette nicht „stabil" – die kleinste Verschiebung nach rechts oder links lässt das Kettenstück ins Bodenlose rutschen.

Die Idee des Perpetuum mobile hat ihren Ursprung wahrscheinlich im 12. Jahrhundert in Indien, von wo sie im 13. Jahrhundert über die Araber nach Europa gelangte. Während die Bewohner arabischer Länder mit ihrem großen Bedarf an Arbeitskraft zur Bewässerung der Felder vielleicht ganz praktisch auf der Suche nach einem Antrieb für ihre zahlreichen Wasserheber waren, hatten nach der Auffassung des Technik-Historikers Friedrich Klemm die Menschen im mittelalterlichen Europa eher einen ideellen Zweck im Sinn: eine immer währende Kreisbewegung als irdisches Abbild der göttlichen Bewegung der himmlischen Sphären zu erschaffen – eine „Profanisierung des aristotelischen Gedankens der allein dem Himmel vorbehaltenen ewigen Kreisbewegungen".

Die Perpetuum-mobile-Konstruktionen des Mittelalters sind, dem Stand der Technik entsprechend, überwiegend Räder mit umklappenden Hebeln oder mit Röhren, die teilweise mit Quecksilber gefüllt sind. Oder in einem Rohrsystem strömt Wasser in einem Kreislauf und leistet Arbeit. Die Erfinder glaubten ein dauerndes Ungleichgewicht schaffen zu können: Durch die Lage der Klapphebel oder Flüssigkeitsspiegel werde der Schwerpunkt des Rades immer auf ein und derselben Seite des Drehpunkts gehalten und bewege sich, während sich das Rad dreht, unablässig abwärts. Wenn das möglich wäre, könnte der Mechanismus fortwährend potenzielle Energie aus dem Schwerkraftfeld in Bewegungsenergie umsetzen und damit Arbeit verrichten. Nur kann der Schwerpunkt des Rades sich höchstens so weit vom Drehpunkt entfernen, wie es die Massen vorgeben; obendrein ist nach einer vollen Umdrehung, wenn der Mechanismus nach der Vorstellung seines Erfinders wieder im selben Zustand ist wie zuvor, auch der Schwerpunkt wieder auf seiner ursprünglichen Höhe.

Wenn schon nicht die Maschinen, so befinden sich die Gedanken der unentwegten Erfinder in unablässiger Bewegung, selbst in unserem aufgeklärten Jahrhundert. Alle denkbaren physikalischen und chemischen Prozesse werden in den Dienst vermuteter Perpetua mobilia gestellt. Arthur W. J. G. Ord-Hume, Flugzeugkonstrukteur und Autor mehrerer Bücher, spricht von der „perpetuity of the perpetual motion inventor".

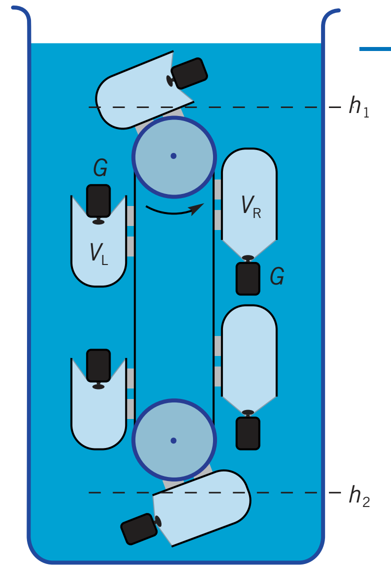
Die Zahl der Ideen und Beweisführungen, die den wissenschaftlichen Akademien zur Prüfung vorgelegt wurden, muss schon vor mehr als zweihundert Jahren so groß gewesen sein, dass die Pariser Académie Royale des Sciences 1775 beschloss, für gewisse Probleme keine Lösungsvorschläge mehr zur Prüfung anzunehmen: die Verdopplung des Würfels nur mit Hilfe von Zirkel und Lineal; die Dreiteilung des Winkels mit denselben Mitteln der klassischen Geometrie; und die Konstruktion einer Maschine in immer währender Bewegung. Die Unlösbarkeit der beiden ersten Aufgaben ist inzwischen mathematisch bewiesen. Dagegen stützt sich die Begründung der Akademie, die Konstruktion eines Perpetuum mobile sei „absolut unmöglich", „nur" auf einen Erfahrungssatz und lässt sich naturgemäß nicht beweisen. Deshalb werden die Perpetuum-mobile-Erfinder wohl auch in Zukunft nicht aussterben.

Energie-Erhaltung: Seit der Formulierung des Satzes von der Erhaltung der Energie (des Ersten Hauptsatzes der Thermodynamik) 1842 durch Robert Julius Mayer nennt man Perpetuum mobile erster Art eine hypothetische Maschine, die den Satz von der Erhaltung der Energie verletzt, das heißt mechanische Arbeit leistet, ohne ihr Äquivalent einem Energiespeicher zu entnehmen, und dadurch die Energie im Universum vermehrt. (Ein Perpetuum mobile zweiter Art wäre dagegen eine Maschine, die – unter Einhaltung des Energieerhaltungssatzes – die ungeordnete Wärmebewegung der Moleküle in geordnete mechanische Bewegung verwandelt, ohne anderwärts größere Unordnung zu erzeugen, und damit den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verletzt.) Könnte man solche Maschinen bauen, stünde Energie zur Fortbewegung, Heizung und Beleuchtung in unbegrenzter Menge zur Verfügung. Bemerkenswert ist auch die Kehrseite der Medaille: Gäbe es solche Maschinen, wären sie gefährlich und müssten aus Sicherheitsgründen verboten werden. Falls nämlich die vorgesehenen Abnehmer der Energie die angebotene Leistung nicht in jedem Augenblick vollständig verbrauchen, speichert die Maschine die produzierte Energie in ihrer Bewegung oder ihrer Struktur, das heißt sie beschleunigt und/oder erhitzt sich, wodurch sie am Ende schmelzen oder explodieren würde. Wundern wir uns also nicht, dass wir heute keine funktionierenden Perpetua mobilia vorfinden: Wenn es sie je gegeben haben sollte, wären sie vor lauter Kraft längst geplatzt!

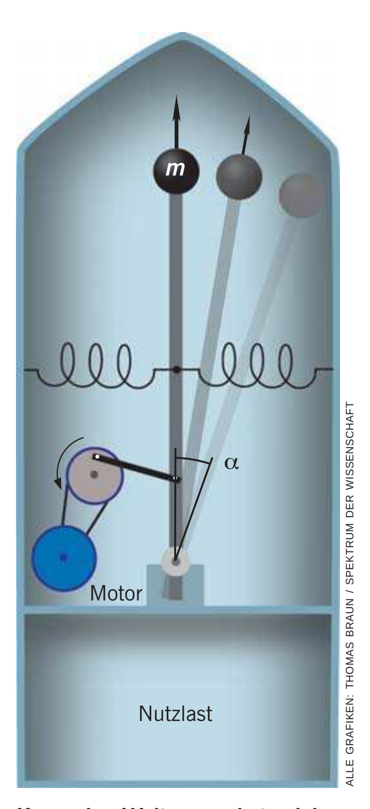
Im Folgenden werde ich drei typische Perpetuum-mobile-Konstruktionen vorstellen und (im „Kleingedruckten") erklären, warum sie nicht funktionieren können.

Auftriebs-Motor: Der Westdeutsche Rundfunk hatte 1979 auf meine Anregung in dem Fernseh-Ratespiel „Kopf um Kopf" ein Perpetuum-mobile-Preisausschreiben ausgelobt. Wir waren skeptisch und rechneten mit Körben voll Einsendungen unbelehrbarer Erfinder. Zu unserer Überraschung gingen jedoch bei der Redaktion nur etwa 150 Vorschläge ein. Ihre Einsender hatten die Aufgabe mehrheitlich als eine Herausforderung an Fantasie und Humor aufgefasst.

Ein typisches Beispiel ist der „Auftriebs-Motor". An einem vertikalen Transportband in einem Wasserbehälter, das über zwei leicht drehbare Rollen läuft, hängt in gleichen Abständen eine größere Zahl von Auftriebsgefäßen (Bild rechts oben). Es handelt sich um starre Flaschen, die mit einer flexiblen Membran verschlossen sind, an der ein schweres Gewicht hängt. Die im Bild rechts hängenden Gefäße haben offenbar größeres Volumen als die linken, weil die Gewichte die Membranen aus der Flasche heraus ziehen. Sie erfahren daher im Wasser bei gleichem Gewicht den größeren archimedischen Auftrieb und



Das Gewicht *G* macht das Gasvolumen der aufsteigenden Behälter größer als das der absteigenden. Dadurch entsteht ein Auftrieb, der die ganze Behälterkette in Bewegung hält – auf ewig?



Kann eine Weltraumrakete sich vorwärts bewegen wie ein Geißeltierchen im Wasser, indem sie mit einem geeigneten Körperteil wackelt? Könnte ein Dackel, dem eine schwere Kugel an den Schwanz gebunden ist, sich durch heftiges Wedeln in die Luft erheben?

Leider kein Perpetuum mobile

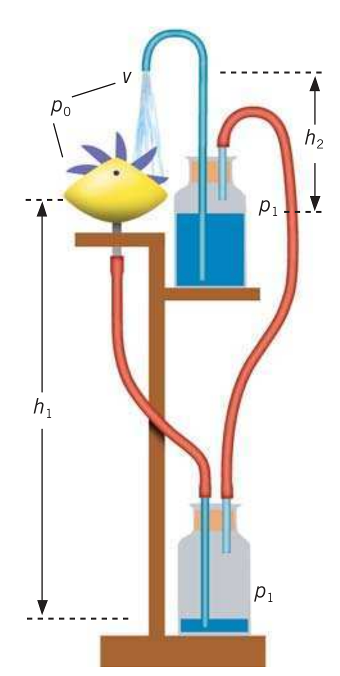
Der **Auftriebs-Motor** leistet die Arbeit $\rho g(h_2 - h_1)\Delta V = (p_2 - p_1)\Delta V$ für jedes Paar von Gefäßen, die von der Tiefe h_2 nach h_1 auf- beziehungsweise von h_1 nach h_2 absteigen, denn das aufsteigende Gefäß hat ein um $\Delta V = V_R - V_L$ größeres Innenvolumen. (ρ ist die Wasserdichte, g die Schwerebeschleunigung; der Wasserdruck p wächst linear mit der Tiefe h unter der Oberfläche: $p = p_0 + \rho g h$, ρ_0 Atmosphärendruck). Aber genau diese Arbeit geht wieder verloren; denn am unteren Wendepunkt muss das Gewicht zur Vergrößerung des Gefäßvolumens um ΔV gegen den Wasserdruck p_2 in der Tiefe h_2 die Arbeit $p_2\Delta V$ leisten. Am oberen Wendepunkt wird dagegen nur die geringere Arbeit $-p_1\Delta V$ durch Kompression des Gefäßvolumens wieder gewonnen. Der Mechanismus würde also sogar verlustfrei laufen, wenn sich das Wasser vom Bug jedes Gefäßes widerstandslos beiseite drücken ließe. Genau dieser Strömungswiderstand bremst jedoch die Bewegung. Außerdem ist das komprimierte Gas in den absteigenden Flaschen heißer als das expandierte in den aufsteigenden. Wenn die Flaschen nicht perfekt wärmeisoliert sind, geht durch den Temperaturausgleich zusätzlich nutzbare Energie verloren. Beide Effekte bringen den „Motor“ zur Ruhe, selbst wenn er aus einem Ungleichgewicht gestartet wird und ein kleines Stück läuft.

Wenn der **Fliehkraft-Motor** funktionierte, würde er nicht nur den Energie-, sondern auch den Impulserhaltungssatz verletzen. Immerhin erzeugt er angeblich Schub ohne Rückstoß. Der Fehler liegt in der unzulässigen Vermischung der Bezugssysteme. Die beschriebene Zentrifugalkraft gibt es nur in dem System, das die Drehung des Antriebshebels mitmacht. Bei der Komponentenzerlegung in eine Schubkraft und eine Querkraft wurde sie aber in einem raketenfesten System interpretiert, für das sie gar nicht existiert. Was nicht da ist, kann auch nichts bewirken – ein grober Fehler, für den ein Physik- oder Ingenieurstudent leicht durch eine Prüfung fallen könnte!

Das Wirkungsprinzip des **Hero-Mobiles** ist das einer „Hero-Fontäne“. Der Kreislauf des Wassers ist nur vorgetäuscht. Im rechten Schlauch strömt kein Wasser, sondern steht Luft, die den Überdruck $p_1 = p_0 + \rho g h_1$ (p_0 Luftdruck der Atmosphäre, ρ Wasserdichte, g Schwerebeschleunigung, h_1 Höhe der linken Wassersäule) von der unteren Flasche in die obere überträgt. Durch den Überdruck p_1 in der oberen Flasche wird das Wasser bei reibungsfreier Strömung mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$ aus der Düse in der Höhe h_2 über dem Wasserspiegel gedrückt und treibt die kleine Turbine an. Sobald alles Wasser aus der oberen Flasche abgeflossen ist, hört das Hero-Mobile auf zu arbeiten.

setzen den Mechanismus entgegen dem Uhrzeiger in Bewegung. Wenn sie oben und unten die Rollen passieren, tauschen die Gefäße ihre Funktionen. Also bleibt die Bewegung für alle Zeit erhalten – ein Perpetuum mobile.

Fliehkraft-Motor: In der April(!)-Ausgabe 1977 der „Physikalischen Blätter“, der Hauszeitschrift der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, wurde „Ein neuartiger Antrieb für Raumflugkörper“ beschrieben. Mit Hilfe eines Exzenters schwenkt ein Motor einen Hebel mit einer Masse m an seinem Ende periodisch in einem gewissen Winkelbereich α um die Raketenachse nach rechts und links (Bild Seite 113 rechts unten). Dabei erfährt angeblich die Endmasse Zentrifugalkräfte in Richtung der Pendelstange. Ihre axialen Komponenten bilden den Schub der Rakete, während sich die Komponenten quer zur Raketenachse im zeitlichen Mittel aufheben. Durch Vergrößerung der Winkelgeschwindigkeit oder Verlängerung des Hebels lässt sich der Schub beliebig steigern, behauptet der Erfinder. Der Raketenmotor arbeitet, wie er hervorhebt, ohne Ausstoß von Masse, extrem sauber und mit hohem Wirkungsgrad. Die Querbewegungen schütteln die Insassen heftig hin und her, was Reisen in diesem Raumschiff wenig komfortabel erscheinen lässt. Sie lassen sich aber vermeiden, wenn der Antrieb des Raumschiffs mit zwei spiegelbildlich bewegten, gleichen Hebeln ausgestattet wird.



Der Kreislauf des Wassers scheint auf ewig das Schaufelrädchen anzutreiben.

Hero-Mobile: Dieses Perpetuum mobile können Sie selber mit wenigen Handgriffen aus dem Wasserrädchen eines Sandspielzeugs für Kleinkinder, zwei undurchsichtigen Polyethylen-Waschflaschen aus dem Chemiepraktikum, zwei Gummischläuchen und etwas Glasrohr zusammenstecken (Bild links).

Bei der Vorführung sehen die Zuschauer Wasser von oben das Wasserrädchen antreiben und im linken Schlauch verschwinden. Der Vorführer behauptet dazu, der rechte Schlauch schließe den Wasserkreislauf. Der Mechanismus sei daher ein Perpetuum mobile.

Ein kleiner Scherz zum Schluss: Schreiben Sie auf beide Seiten eines Zettels „Bitte wenden“ und lassen Sie ihn so unauffällig-auffällig zu Boden flattern, dass er die Aufmerksamkeit der umstehenden Leute weckt. Irgendjemand wird neugierig genug sein, den Zettel aufzuheben, die Botschaft zu lesen und auf die Rückseite des Zettels zu schauen. Vielleicht hat er Freude am Schabernack und will den Spaß auch anderen gönnen. Das Spiel kann beliebig weitergehen.

Also ist der Zettel eine Maschine in permanenter Bewegung. Natürlich erzeugt er dabei keine Energie. Aber im übertragenen Sinne lebt er von einer – fast – unerschöpflichen Energiequelle: der menschlichen Neugier. ■

Literaturhinweise

Perpetuum mobile. Von Friedrich Klemm. Harenberg, Dortmund 1983.

Perpetual Motion – The History of an Obsession. Von Arthur W. J. G. Ord-Hume. George Allen & Unwin, London 1977.

Kontaktlinsen

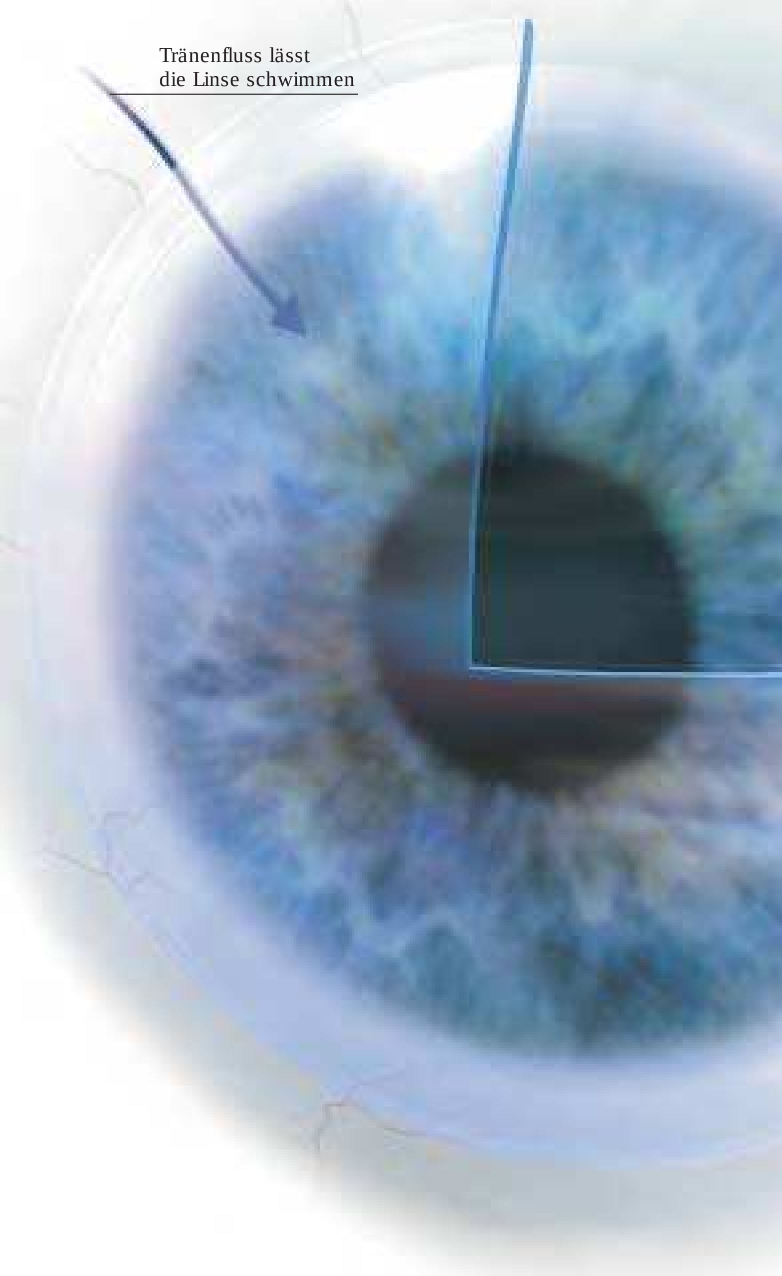
Auf den Augen von etwa zweieinhalb Millionen Deutschen schwimmen kleine Plastikscheibchen, die das Licht brechen und ihnen so klare Sicht verschaffen. Weniger als 15 Prozent der Kontaktlinsenträger verwenden starre, gasdurchlässige Linsen, die bei richtiger Handhabung jahrelang halten können. Sie bestehen aus Kunststoffpolymeren wie Zellulose-Acetat-Butyrat, Polyacrylat-Silikon oder Silikon-Elastomeren. David T. Grubb, Materialwissenschaftler an der Cornell Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York), beschreibt ihre Molekülstruktur als Netz, durch dessen Maschen Sauerstoff zum Gewebe der Hornhaut gelangen kann.

Die Mehrheit der Kontaktlinsenträger bevorzugt weiche Sehhilfen, wegen des hohen Wasseranteils von bis zu 69 Prozent auch Hydrogel-Linsen genannt. Sie sind bequemer, halten allerdings nicht so lange und werden nach einem Tag, zwei Wochen oder mehreren Monaten weggeworfen. Die letzten beiden Typen bedürfen der täglichen Reinigung. Es gibt auch Hydrogel-Sehhilfen, die bis zu einer Woche Tag und Nacht im Auge verbleiben; eine Zulassung von Monatslinsen ist in den USA beantragt.

Hydrogel-Polymere nehmen Wasser auf, das den Sauerstoff zur Hornhaut transportiert. Einige Polymermischungen sind darin besser als andere, jedoch, so George Grobe vom Optikunternehmen Bausch & Lomb, haften dann in der Tränenflüssigkeit gelöste Proteine verstärkt an der Linse, was einer Infektion Vorschub leisten kann. Es gilt, die optimale Mischung zu finden. ***Naomi Lubick***

Die Autorin ist ständige Korrespondentin von Scientific American.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*



Ringe steigender oder abnehmender Brechkraft

+

–

Weiche oder harte Bifokallinsen in „Bullaugenform“ bestehen aus konzentrischen Ringen von Materialien, welche die Sehkraft in unterschiedlicher Stärke korrigieren. Betrachtet man einen Gegenstand, so wählt das Gehirn automatisch den Ring mit der besten Fokussierung aus (genauer gesagt: Unter den vielen Bildern, welche die Netzhaut erreichen, wählt es das schärfste).

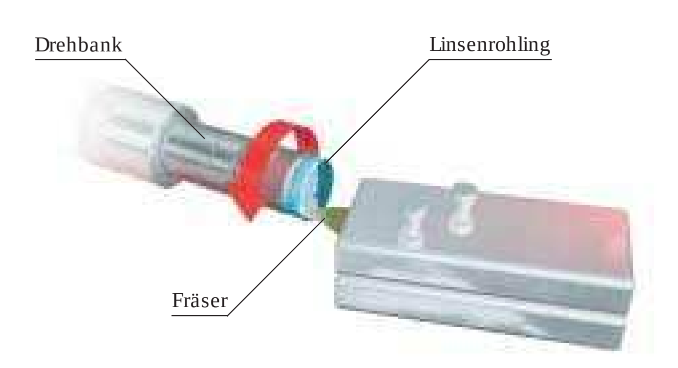
Bifokallinse

–

+

Bei harten Kontaktlinsen kann man Material unterschiedlicher optischer Brechung in die Rückseite einschmelzen und erhält bifokale Linsen, ähnlich wie bei Brillengläsern. Zur Korrektur von Astigmatismus werden die Sehhilfen einseitig gewichtet, damit sie sich richtig auf dem Auge positionieren.

Weiche Kontaktlinsen passen sich an die Form der Augen an, die ja nicht perfekt kugelförmig sind. (Harte müssen entsprechend ausgehöhlt werden, da sie sonst nicht haften.) Sie bedecken auch Hornhautrand- und Lederhautbereiche (das Weiße) des Auges und werden dank ihrer Größe teilweise durch die Augenlider fixiert. Zudem sorgt der Flüssigkeitsfilm der Tränen für Oberflächen- (Kapillar-) Anziehung, sodass harte und weiche Linsen festgehalten werden.



An einer computergesteuerten Drehbank werden die Kunststoff-Rohlinge für starre gasdurchlässige und einige weiche Linsen hergestellt. Dieser Aushöhlvorgang folgt einer topographischen Karte des Auges des Patienten.



CIBAVISION

Für die Massenproduktion von weichen Kontaktlinsen verwenden die Hersteller Gießformen. Das Polymer wird in die Form gespritzt und mit Ultraviolettlicht gehärtet. Danach erhalten die Linsen ihren Wasseranteil und werden geschliffen.

Wussten Sie schon ... ?

➤ **Kontaktlinsen** statt Brille tragen hier zu Lande nur drei Prozent der Bevölkerung, in den USA hingegen waren es 1999 nach einer Statistik des Contact Lens Council fast 13 Prozent.

➤ Eine **Bindehautentzündung** (Konjunktivitis) kommt eher selten vor, bei Langzeitkontaktlinsen ist das Erkrankungsrisiko aber immerhin etwa zehnmal größer als bei Ein-Tages-Linsen.

➤ Die **Tränenflüssigkeit** entsteht hauptsächlich in der Tränendrüse und dient dem Schutz und der Reinigung des Auges. Sie besteht zwar vor allem aus Wasser und Salz, enthält aber auch Proteine, Glukose, Kalium, Natrium, Kalzium, Chlor, Bikarbonat, Ammonium, Stickstoff, Zitronen- und Ascorbinsäure, Lysozyme und weitere Substanzen. Die Mischung variiert von Mensch zu Mensch. Da wundert es nicht, dass Tränen auf Kontaktlinsen unerwünschte Rückstände hinterlassen.

➤ **Kontaktlinsen** können die Entzündung der Hornhaut (Keratitis) durch Viren oder Mikroben fördern, denn bei mangelnder Hygiene setzen sich mikrobielle Erreger leicht an der Linse fest. Rötungen des Auges, Lichtscheuheit und unter Umständen starke Augenschmerzen sind die Folge.

GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE

Der Stoff, aus dem die Sterne sind

Das Gas in den weiten Räumen zwischen den Sternen war den Astronomen lange Zeit nur lästig, weil es den Blick auf ferne Himmel behindert. Doch die extrem fein verteilte interstellare Materie ist die wichtigste Quelle und Senke im Stoffkreislauf des Universums.

Original oder Fälschung?

In der Renaissance war klar: Wer am französischen Königshof auf sich hielt, kaufte Maleremails aus Limoges. Jahrhunderte später kamen sie erneut in Mode, Imitationen überschwemmten den Markt. Die Naturwissenschaft soll nun helfen, Originale von Fälschungen zu unterscheiden.



Wer ist die Schönste? Das Paris-Urteil war ein beliebtes Motiv auf Maleremails.



EYE OF SCIENCE

Gesicht der Larve einer Aasfliege

Was Insekten über Leichen verraten

Insekten und ihre Maden können einem Entomologen enthüllen, zu welchem Zeitpunkt und unter welchen Umständen der Tod eines Menschen auftrat.

Weitere Themen im März

Hypercomputer (Teil II): Der Supercomputer zum Selberbasteln

Was macht man, wenn man hohen Rechenbedarf hat, aber kein Geld? Man stöpselt lauter ausgediente PCs zu einem Rechnerverbund zusammen.

Globale Volksseuche Diabetes

Bis 2005 wird sich die Zahl der Zuckerkranken weltweit verdoppeln. Experten suchen nach neuen Wegen, gefährdete Menschen möglichst früh zu erkennen und zu behandeln.

Warum teilen und helfen?

Eine Kombination von Biologie und Ökonomie könnte erklären, warum wir Fairness höher bewerten als Eigennutz.

Menschheit im Flaschenhals

Nach dem Jahrhundert von Wissenschaft und Technik ruft der Biologe Edward O. Wilson nun das Jahrhundert der Umwelt aus.